

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(MENTION SCIENCES)

PAR

Jean LELOUP

PREMIÈRE THÈSE

Nouveaux types de chambres à étincelles destinées à localiser des corps radioactifs émetteurs de rayons X ou γ et leur application en médecine

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 15 Mars 1967 devant la Commission d'examen

MM. M. LEFORT

Président

M. DUQUESNE

J. LABEYRIE

} Examineurs

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(MENTION SCIENCES)

PAR

Jean LELOUP

PREMIÈRE THÈSE

Nouveaux types de chambres à étincelles destinées à localiser des corps radioactifs émetteurs de rayons X ou γ et leur application en médecine

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 15 Mars 1967 devant la Commission d'examen

MM. M. LEFORT

Président

M. DUQUESNE

J. LABEYRIE

} Examineurs

THÈSE

présentée

À LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour l'obtention

DU TITRE DE DOCTEUR EN SCIENCES
(MÉTIERS SCIENTIFIQUES)

par

Monsieur

André

Le candidat déclare que la thèse qu'il présente est son œuvre personnelle et qu'elle n'est pas le fruit d'un plagiat.

Fait à Paris, le

10 Mars 1924



La thèse a été déposée le 10 Mars 1924

à la

Bibliothèque

de la Faculté

des Sciences

Je prie Monsieur le Professeur Pierre GRIVET qui a patronné mon travail et Monsieur le Professeur Marc LEFORT qui a bien voulu présider le jury, de recevoir l'expression de ma respectueuse gratitude.

Je remercie Monsieur le Professeur Maurice DUQUESNE de l'intérêt qu'il a porté à mon travail et de sa participation au jury.

C'est pour moi un devoir agréable de remercier Monsieur Jacques LABEYRIE, Chef du Service d'Electronique Physique au Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, qui m'a permis de réaliser cette étude et m'a guidé de ses conseils.

Monsieur le Professeur Claude KELLERSHOHN s'est depuis le début de mon travail intéressé à la chambre à étincelles, je le remercie particulièrement de m'avoir aidé dans l'expérimentation.

Que Monsieur André BLANC trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour le soutien qu'il m'a apporté.

Monsieur Alain LANSIART a suivi de très près l'évolution de mon travail : qu'il trouve ici mes remerciements et ma reconnaissance.

Je remercie également Messieurs Jean LEQUAIS, Jean-Pierre MORUCCI, Georges ROUX et Bernard TURCK pour l'aide qu'ils m'ont prodiguée.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549022_0050

SOMMAIRE

	Pages
I- INTRODUCTION	1
II- ETUDES ET RECHERCHES PRELIMINAIRES	3
1- Phénomènes électriques utilisés dans les chambres à étincelles	3
1- Fonctionnement avec une tension continue inférieure à la tension disruptive	3
2- Fonctionnement avec une tension supérieure à la tension disruptive	9
2- Recherches expérimentales préliminaires	13
1- Fonctionnement en compteur proportionnel	13
2- Fonctionnement en chambre à étincelles	20
3- Conclusion sur le fonctionnement d'un même appareil en régime d'avalanches et en régime d'étincelles	21
III- RECHERCHE DES POSSIBILITES DE DECLENCHEMENT D'UNE CHAMBRE A ETINCELLES DESTINEE A DETECTER DES RAYONNEMENTS DE FAIBLE ENERGIE	23
1- Premiers résultats de déclenchement et de localisation à la pression de 100 mm Hg	23
1- Premiers résultats de déclenchement	23
2- Premiers résultats de localisation	29
2- Résultats obtenus à la pression atmosphérique avec une source β	33
1- Premiers résultats de déclenchement et de localisation obtenus à la pression atmosphérique	33
2- Résultats obtenus avec la chambre à 2 électrodes et une source β	35
3- Essai avec électronique à transistors	41
3- Essai d'une chambre à 3 électrodes, à la pression atmosphérique, avec une source X	43
1- Résultats obtenus en chambre déclenchée	43
2- Nouveau mode de fonctionnement de chambre à étincelles	45
4- Conclusion sur les essais de chambre à étincelles auto-déclenchée	45
IV- ETUDE DE LA CHAMBRE A ETINCELLES A TROIS ELECTRODES FONCTIONNANT AVEC UNE HAUTE TENSION CONTINUE	49
1- Généralités : description des dispositifs et des méthodes d'étude utilisés	49
2- Caractéristiques de fonctionnement de la chambre à étincelles à 3 électrodes	57
1- Courbes caractéristiques de fonctionnement en fonction des tensions appliquées sur "l'espace étincelles" et "l'espace détection"	57
2- Evolution des avalanches électroniques lorsque la tension sur l'espace détection varie	61
3- Interprétation des courbes caractéristiques à l'aide de l'étude des avalanches	73
4- Remarques sur la formation des étincelles	73

3.- Résultats donnés par la chambre avec des rayonnements d'énergies et d'intensités diverses	77
1- Etude du rendement de la chambre	79
2- Courbe de réponse de la chambre en fonction de l'intensité de la source et bruit de fond	85
3- Localisation donnée par la chambre; étude de la définition	87
4.- Influence de différents paramètres sur le fonctionnement de la chambre	89
1- Perturbations apportées par les étincelles et possibilités pour les limiter	93
2- Influence de la lumière et de la température ambiante	95
3- Influence de la qualité du gaz	97
5.- Conclusion sur les essais de la chambre à 3 électrodes fonctionnant avec une haute tension continue	103
 V- PREMIERS RESULTATS "IN VIVO" OBTENUS AVEC UN APPAREIL FONCTIONNANT AVEC DU XENON ET AVEC UN VERRE CONDUCTEUR COMME ANODE	105
 VI- CONCLUSION	113
 BIBLIOGRAPHIE	116

I - INTRODUCTION

1 - AVANT PROPOS

L'emploi de détecteurs nucléaires pour la localisation "in vivo" de produits radioactifs contenus dans un organe croît rapidement car les "traceurs" radioactifs sont de plus en plus utilisés pour faire certains diagnostics en médecine.

Actuellement deux dispositifs sont ordinairement employés. Dans le premier cas un détecteur classique à scintillation muni d'un blindage donnant un effet de détection directif analyse tous les points de l'objet par balayage. Il fait apparaître les différences d'activité entre les diverses régions explorées. Le fonctionnement est sûr mais les mesures sont longues. Dans le deuxième cas, une caméra de scintigraphie, dite détecteur stationnaire analyse tous les points de l'objet à la fois. C'est un scintillateur de grande surface vu par plusieurs photomultiplicateurs. L'étude, par des circuits électroniques, des différents signaux obtenus, restitue sur un écran oscillographique la position de chaque scintillation invisible directement. Chacun de ces points qui marque l'endroit de passage d'une particule à travers le scintillateur représente l'image du point de l'objet ayant émis la particule. Ce résultat est obtenu par un blindage muni d'un petit trou qui joue le rôle du sténopée pour la lumière (d'où le nom anglo-saxon de "pinhole-camera"). Il peut être obtenu aussi par une "grille collimatrice", blindage percé de nombreux canaux parallèles et placé contre le détecteur; à chaque canal correspond une petite zone de l'objet observé. Cet appareil donne des résultats rapides mais la restitution de l'image par l'électronique est complexe; cette électronique apporte souvent des distorsions, elle nécessite des réglages délicats assez fréquents et elle est relativement coûteuse.

Dans d'autres domaines, en particulier dans la physique des hautes énergies, la localisation de traces de particules est obtenue efficacement et de manière précise par des appareils relativement simples et bon marché : les chambres à étincelles.

Il apparaissait donc intéressant d'adapter un appareil de ce genre à l'étude de la distribution de la radioactivité dans un organe.

2 - PROBLEMES POSES

La chambre à étincelles peut être construite sous forme d'un détecteur de grande surface à électrodes planes parallèles dont les étincelles sont visibles à travers l'électrode supérieure transparente. Chaque point de l'objet étudié, représenté par un point du plan de la chambre, est analysé en permanence et l'ensemble des étincelles donne l'image de la distribution de la radioactivité.

Pour que l'étincelle, formée au point de passage d'une particule à travers la chambre, soit l'image du point de l'objet qui a émis la particule, il suffit d'adapter à la chambre un système "d'opti-

que pour corpuscules" analogue à l'un de ceux employés pour la caméra de scintigraphie.

Le problème nouveau que pose l'appareil envisagé est de faire à la fois la détection de la particule et la localisation du point de passage. Les seules chambres à étincelles d'un fonctionnement sûr pratiquement utilisées sont celles qui sont employées pour la physique des hautes énergies. Elles ne font que la fonction de localisation : la perturbation provoquée dans la chambre par la particule sert de germe à l'étincelle qui est provoquée par une impulsion de haute tension commandée de l'extérieur. L'organe de commande, distinct de la chambre, est en général un détecteur à scintillation qui détecte la particule, particule de haute énergie ou cosmique, sans pratiquement la perturber. Dans les applications projetées, les rayonnements à analyser, γ de moyenne ou faible énergie, ou X, ne peuvent être détectés par un appareil extérieur qui modifierait leur parcours ou les absorberait complètement. La chambre étudiée doit donc à la fois détecter et localiser le passage des particules. C'est un appareil de physique nouveau pouvant localiser n'importe quelle source de rayonnement de faible énergie.

3 - ETUDES EFFECTUEES

Un même montage à électrodes planes parallèles peut fonctionner soit en compteur proportionnel, soit en chambre à étincelles suivant les conditions d'emploi. Monsieur LANSIART* a pensé que ce même montage pourrait successivement servir de détecteur puis de chambre à étincelles : l'appareil fonctionnant en régime de compteur proportionnel détecte la particule, l'impulsion produite commande, par une électronique extérieure, un signal de haute tension qui, appliquée au même dispositif, produit une étincelle localisant le point de passage de la particule. Le problème est de pouvoir déclencher une étincelle sur un signal de compteur après un certain temps. Il est donc nécessaire de connaître les phénomènes électriques dans les gaz utilisables dans l'appareil projeté. Une étude des différents types de chambres à étincelles déjà employées ou étudiées donnera la manière dont on peut utiliser certains phénomènes et les inconvénients qu'ils peuvent présenter. Il faut aussi connaître les conditions dans lesquelles l'appareil pourra être utilisé au mieux car les conditions dans lesquelles peuvent s'effectuer les décharges dans les gaz sont très variées. Nous avons donc cherché, sur un montage expérimental, quelles sont les meilleures conditions qui permettent à la fois d'obtenir un signal utilisable pour déclencher l'étincelle et un bon fonctionnement en régime d'étincelles.

Après avoir déterminé ces conditions d'emploi de la chambre, nous avons cherché à obtenir le déclenchement d'une étincelle localisée à partir du signal de compteur proportionnel donné par le même dispositif. Après avoir obtenu de premiers résultats satisfaisants, nous avons été conduits, pour augmenter le rendement, à utiliser un dispositif à trois électrodes.

Nous avons alors mis en évidence un nouveau mode de fonctionnement de la chambre : dans certaines conditions, avec le montage à trois électrodes, l'étincelle se forme spontanément dans la chambre à l'endroit de passage de la particule sans le concours d'une électronique extérieure associée, autre que les alimentations. Ce phénomène est très intéressant car il permet d'obtenir des dispositifs très simples. Il peut être utile aussi pour la connaissance de la formation des décharges dans les gaz car il en permet l'étude dans des conditions expérimentales un peu particulières.

Nous avons étudié les caractéristiques d'un montage utilisant ce principe.

Nous avons enfin utilisé un premier prototype industriel pour des explorations "in vivo" et nous avons comparé ses performances à celles d'un détecteur à balayage.

*Service d'Electronique Physique - C.E.N. Saclay

II - ETUDES ET RECHERCHES PRELIMINAIRES

Ce chapitre résume les principaux phénomènes électriques rencontrés dans l'étude de la chambre à étincelles et leur utilisation dans les divers types de chambres déjà employées ou étudiées. Il donne aussi les résultats expérimentaux obtenus en étudiant dans diverses conditions les caractéristiques des impulsions de compteur et des étincelles. Ces résultats permettront de déterminer les conditions d'emploi de la chambre et les caractéristiques de l'électronique à associer.

1 - PHENOMENES ELECTRIQUES UTILISES DANS LES CHAMBRES A ETINCELLES

Le dispositif étudié est formé de deux électrodes planes parallèles entre lesquelles est appliquée une tension continue U_A . Une particule ionisante crée des paires ion - électron dans l'espace inter électrodes. Si la tension U_A est suffisante mais inférieure à une tension critique U_d , tension disruptive ou de décharge, il se forme des petites impulsions électriques brèves : c'est le régime proportionnel. Si la tension U_A est égale ou supérieure à la valeur U_d , il se forme des étincelles; c'est le fonctionnement en chambre à étincelles. Ces phénomènes sont décrits de manière détaillée par plusieurs auteurs [1] à [5].

1.- Fonctionnement avec une tension continue inférieure à la tension disruptive -

La variation du nombre de charges recueillies sur les électrodes en fonction de la tension U_A est donnée (Pl. 1-1).

$0 < U_A < U_1$: on ne recueille que quelques charges sur les électrodes à cause des recombinaisons dans le gaz

$U_1 < U_A < U_2$: toutes les charges primaires Q_0 sont recueillies

$U_2 < U_A < U_3$: il y a multiplication des charges dans l'espace inter électrodes; les électrons acquièrent assez d'énergie pour ioniser d'autres molécules par choc. Il se forme des avalanches électroniques, accompagnées de phénomènes d'excitation avec émission de photons.

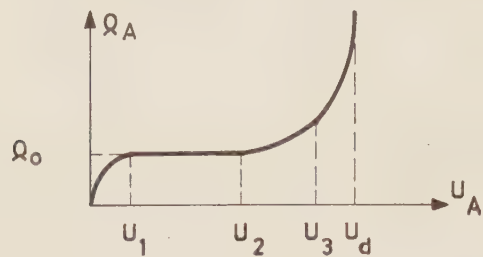
$U_3 < U_A < U_d$: la multiplication des charges est encore plus importante : il se produit des avalanches secondaires. Elles sont dues principalement à l'émission d'électrons par la cathode sous l'effet des ions et des photons de l'avalanche primaire.

$U_A \geq U_d$: l'ionisation dans le gaz devient si importante qu'il y a claquage avec formation d'une décharge lumineuse donnant un courant important.

Entre U_1 et U_2 le dispositif fonctionne en chambre d'ionisation; les impulsions obtenues, avec les particules de faible énergie utilisées, sont trop petites pour être détectables. Le dispositif sera donc utilisé comme détecteur dans la région $U_2 < U_A < U_d$ c'est-à-dire dans le régime que nous appelons "proportionnel" bien que ce terme ne soit pas tout à fait propre. Ce fonctionnement en "compteur", nommé ainsi pour le différencier du fonctionnement en chambre à étincelles est résumé ci-après.

FONCTIONNEMENT EN COMPTEUR PROPORTIONNEL A UNE TENSION INFÉRIEURE A LA TENSION DISRUPTIVE

1) Variation du nombre de charges recueillies en fonction de la tension appliquée



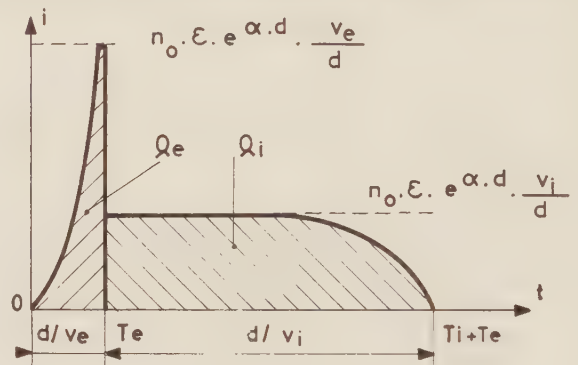
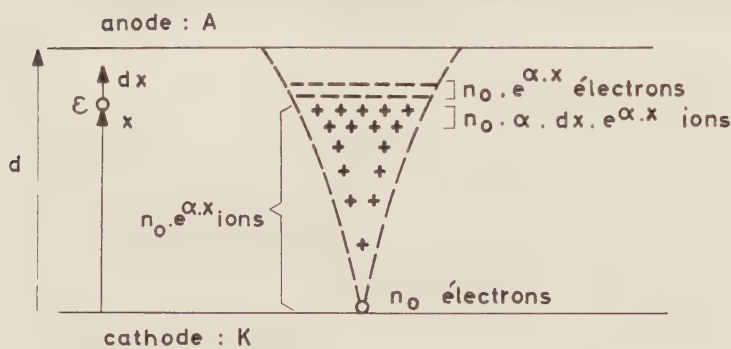
Q_0 : charges primaires créées par la particule ionisante

Q_A : charges recueillies

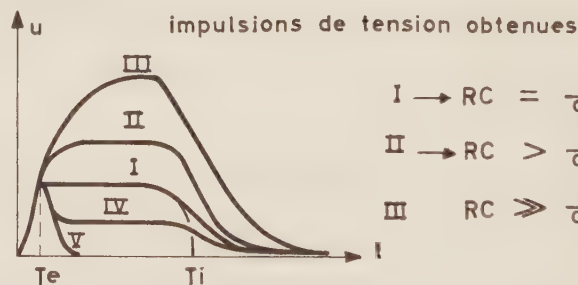
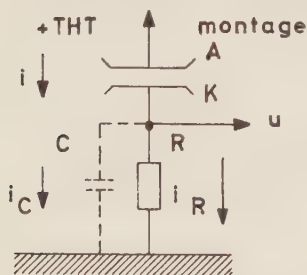
U_A : tension continue appliquée

2) Développement d'une avalanche :

charges et courants créés par le déplacement des électrons et des ions



3) Impulsions de tension obtenues



$$I \rightarrow RC = \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$$

$$II \rightarrow RC > \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$$

$$III \rightarrow RC \gg \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$$

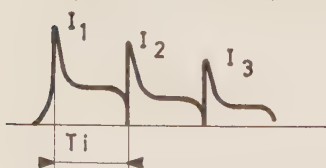
$$IV \rightarrow RC < \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$$

$$V \rightarrow RC \ll \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$$

4) Impulsions avec avalanches secondaires :

- impulsions données par l'action des ions sur la cathode

impulsions théoriques

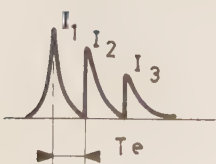


impulsions réelles : $\mu_i < 1$

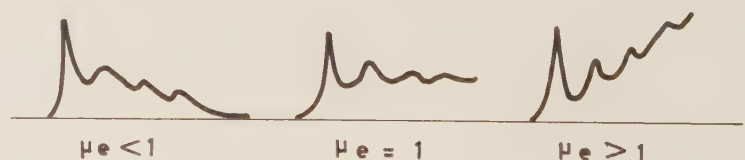


- impulsions données par l'action des rayons UV sur la cathode :

impulsions théoriques :



impulsions réelles



$\mu_e < 1$

$\mu_e = 1$

$\mu_e > 1$

a) L'avalanche électronique

La multiplication des charges est exponentielle : la charge initiale Q_0 , au bout d'un parcours x_{cm} dans le champ, produit une charge Q_x .

$$Q_x = Q_0 \cdot e^{\alpha \cdot x}$$

α , 1^o coefficient de TOWNSEND, est le nombre de paires d'ions formés par un électron sur un parcours de 1 cm. Il varie avec le champ E, la pression et la nature du gaz.

Il peut être notablement augmenté par la présence d'un autre gaz (effet PENNING qui se produit lorsque les états excités des atomes d'un gaz peuvent ioniser les atomes du second).

L'avalanche peut atteindre 10^7 à 10^9 électrons et donner un signal maximal de l'ordre de 0,5 V [6].

Le déplacement des électrons est beaucoup plus rapide que celui des ions et cela donne une forme caractéristique à l'impulsion de courant fournie par l'avalanche. (voir Pl. 1-2).

Pour les valeurs de E/p utilisées (1 à 20 V.cm⁻¹.mm Hg⁻¹),

la vitesse des électrons est : $v_e = 10^6$ à 10^7 cm.s⁻¹

la vitesse des ions est : $v_i = 10^4$ à 10^5 cm.s⁻¹

Les charges et les courants créés par une avalanche sont les suivants : (voir Pl. 1-2)

- pour un électron (charge ϵ)

- la charge induite sur l'anode est : $q = \epsilon \cdot \frac{x}{d}$

- le courant induit est : $i = \epsilon \cdot \frac{v_e}{d}$ ($i = \frac{dq}{dt} = \epsilon \cdot \frac{dx}{dt}$)

- les formules simplifiées suivantes donnent les charges et les courants créés par une avalanche formée à partir de n_0 électrons primaires situés à la cathode : (le temps T_e est considéré comme négligeable devant le temps T_i).

charges données par les électrons au temps T_e : $Q_e = \frac{n_0 \cdot \epsilon \cdot e^{\alpha \cdot d}}{\alpha \cdot d}$

charges données par les ions au temps T_i : $Q_i = n_0 \cdot \epsilon \cdot e^{\alpha \cdot d} \left(1 - \frac{1}{e^{\alpha \cdot d}}\right)$

charges totales données au temps T_i : $Q_T = n_0 \cdot \epsilon \cdot e^{\alpha \cdot d}$

courant dû aux électrons (à l'instant t : $t < T_e$) : $i_e = n_0 \cdot \epsilon \cdot e^{\alpha \cdot d} \cdot \frac{v_e}{d}$

courant dû aux ions : (à l'instant t : $t < T_i$) : $i_i = n_0 \cdot \epsilon \cdot (e^{\alpha \cdot d} - e^{\alpha \cdot v_i \cdot t}) \cdot \frac{v_i}{d}$

- charges données par une avalanche formée à partir de n_0 électrons primaires situés à l'abscisse $x = 1$:

$$Q_T = n_0 \cdot \epsilon \cdot e^{\alpha \cdot d} (d - 1)$$

- charges données par une avalanche formée à partir de n_0 électrons primaires uniformément répartis entre la cathode et l'anode :

$$Q_T = n_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{e^{\alpha \cdot d} - 1}{\alpha \cdot d}$$

Application à la détermination des caractéristiques des avalanches à partir des impulsions de tension obtenues. Voir (Pl. 1-3) le schéma de principe et la forme des impulsions.

- la majorité des ions sont créés près de l'anode. L'impulsion de courant donnée par la migration des ions est pratiquement constante pendant un temps un peu inférieur à T_i et est égale à :

$$i_i \approx n_0 \cdot \epsilon \cdot e^{\alpha \cdot d} \cdot \frac{v_i}{d}$$

- L'impulsion de tension obtenue aux bornes de la chambre dépend des valeurs de R et de C; elle est telle que : $\frac{u}{R} + \frac{C}{dt} \frac{du}{dt} = i$ $i = i_R + i_C$

- Si la constante de temps RC est convenable (RC de l'ordre de $\frac{1}{\alpha \cdot v_i}$), l'impulsion de tension comporte aussi un plateau pendant le temps de migrations des ions :
à ce moment $\frac{du}{dt} = 0$ et $u_i = i_i \cdot R = n_0 \cdot e \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{v_i}{d} \cdot R$

- L'impulsion de tension donnée par les électrons a pour valeur au temps T_e :

$$u_e = \frac{Q_e}{C} = \frac{n_0 \cdot e \cdot \alpha \cdot d}{\alpha \cdot d} \cdot \frac{1}{C} \quad (\text{car } RC \gg \frac{1}{\alpha \cdot v_e})$$

- L'impulsion de tension donnée par les électrons est égale à la tension donnée par la migration des ions lorsque : $u_i = u_e$ ou $n_0 \cdot e \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{v_i}{d} \cdot R = n_0 \cdot e \cdot \alpha \cdot d \cdot \frac{1}{\alpha \cdot d} \cdot \frac{1}{C}$

$$\text{soit lorsque : } RC = \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$$

- L'impulsion de tension obtenue est donnée (Pl. 1-3).

Lorsque $RC \neq \frac{1}{\alpha \cdot v_i}$ la forme de l'impulsion est différente (voir Pl. 1-3).

- Dans le cas pratique, en jouant sur la valeur de R, il est possible d'obtenir la forme I. C étant mesuré et v_i étant déduit de la forme de l'impulsion ($v_i = \frac{l_i}{d}$), il est possible de déterminer α (à 10 % près) :

$$\alpha = \frac{1}{R \cdot C \cdot v_i}$$

De la mesure de u (sur la même impulsion) se déduisent le nombre de charges créées au temps T_e : $Q_e = u \cdot C$ et le nombre de charges contenues dans l'avalanche $Q_T = Q_e \times \alpha \cdot d$.

Effets secondaires :

La forme des impulsions obtenues en présence d'avalanches secondaires est donnée (Pl. 1-4).

Lorsque les avalanches secondaires sont provoquées par les ions, le nombre moyen d'électrons émis pour un ion arrivant à la cathode est : γ_i (2^o coefficient de TOWNSEND). Les amplitudes I_1, I_2, I_3 , des impulsions successives sont telles que :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_3}{I_2} = \gamma_i (e \alpha \cdot d - 1) = \mu_i$$

Lorsque les effets secondaires sont donnés par les photons, le coefficient d'émission secondaire varie mais la relation entre les amplitudes des impulsions successives reste analogue.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_3}{I_2} = \gamma_p (e \alpha \cdot d - 1) = \mu_p$$

Le coefficient γ_p dépend du gaz. L'addition d'une vapeur qui absorbe les rayons UV diminue γ_p et permet d'obtenir des avalanches nettement plus importantes car elle augmente la tension de décharge.

Compteur à plaques parallèles en régime proportionnel

Un compteur de ce type a été réalisé par BAGGE E et CHRISTIANSEN J. [6]. Avec des mélanges de vapeur organique, ils ont obtenu des impulsions importantes 10^{-5} V à 0,5 V et un rendement égal au rendement théorique de détection.

b) Formation de la décharge - Critère de TOWNSEND :

Lorsque μ est supérieur à 1 ($\mu = \mu_i + \mu_p$), l'impulsion de courant ne s'arrête pas d'elle même après le passage de la particule; elle est entretenue. C'est une décharge de TOWNSEND qui se transforme en décharge lumineuse diffuse si la pression du gaz est assez faible; dans certains cas, elle peut se transformer en étincelle.

$$\text{Critère de TOWNSEND : } \mu = \gamma (ea \cdot d - 1) = 1$$

La tension disruptive U_d est celle pour laquelle γ et α répondent à ce critère

La tension U_d passe par un minimum de quelques centaines de volts quand le produit p.d. est de l'ordre de 0,1 à 10 cm.mm Hg; au-dessus de ces valeurs, la tension U_d croît avec la distance et avec la pression. Un mélange de gaz donnant un effet PENNING diminue la valeur de U_d ; par contre la présence d'une vapeur qui se décompose en absorbant les photons diminue le coefficient γ_p et augmente la valeur de U_d .

Théorie du canal ionisé ou "streamer" donnée par LOEB, MEEK et RAETHER.

Au-dessus d'une certaine pression et avec un mélange contenant une vapeur, la décharge n'est plus lumineuse mais sous forme d'étincelle fine, sa formation rapide est incompatible avec le critère de TOWNSEND.

Théorie du canal ionisé : La décharge est due principalement à l'effet de charge d'espace créé à la tête de l'avalanche par un grand nombre de charges et à la photo-ionisation du gaz. (voir Pl. 2-1).

- $\alpha)$ E_2 devient assez fort pour retenir, à la tête de l'avalanche, un certain nombre d'électrons qui forment une traînée de plasma vers l'anode.
- $\beta)$ E_3 est assez important pour attirer les électrons formés par photo-ionisation du gaz; ceux-ci forment des avalanches qui prolongent la colonne de plasma vers la cathode.
- $\gamma)$ Un canal continu de plasma entre les électrodes provoque une étincelle. Pour l'obtenir, d'après MEEK, il faut un champ suffisant (E_r) à la tête de l'avalanche : $E_r = k \cdot E_0$ avec ($0,1 < k < 1$); d'après RAETHER, il faut un nombre de charges dans l'avalanche de l'ordre de 10^8 à 10^{10} électrons.

Transition entre les deux types de décharges

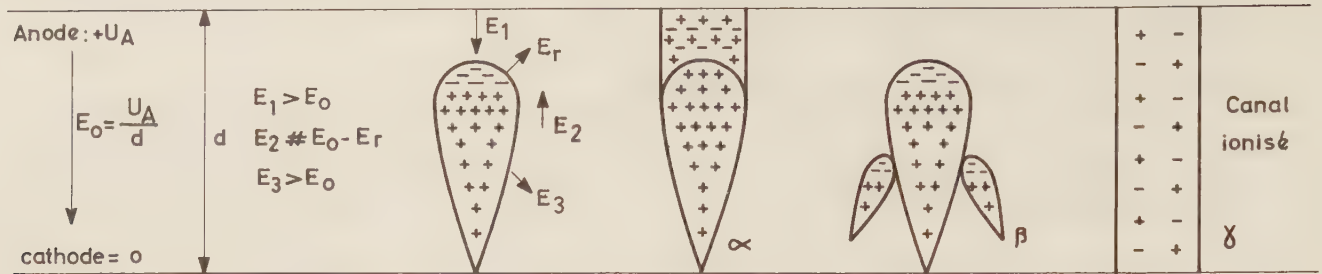
Suivant les conditions expérimentales, (tension appliquée, pression et nature du gaz...) il est possible d'obtenir l'une ou l'autre forme de décharge.

Dans certains cas, une suite d'avalanches ou décharge de TOWNSEND peut donner lieu à une décharge par canal ionisé c'est-à-dire à une étincelle. RAETHER a étudié ces transitions ([5] pages 140 et suivantes); en voici quelques exemples que nous retrouverons dans l'étude de la chambre à étincelles.

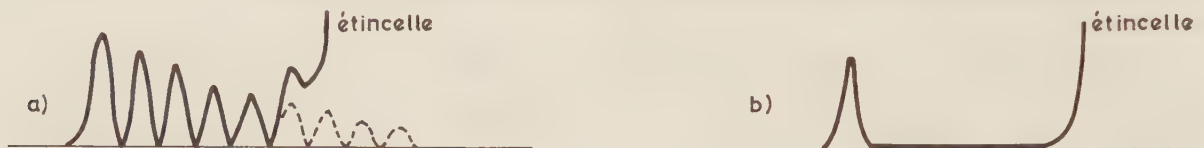
Une certaine absorption, dans le gaz, des rayons UV de l'avalanche peut permettre d'obtenir à la fois une multiplication importante dans l'avalanche et ainsi un nombre d'électrons voisin du nombre critique en même temps que des avalanches secondaires décroissantes ($\mu < 1$) données par l'action des rayons UV sur la cathode. Au bout d'un certain nombre d'avalanches secondaires, les ions accumulés près de l'anode déforment le champ et il peut se produire une décharge par étincelle. La décharge peut

PL:2. FONCTIONNEMENT EN CHAMBRE A ETINCELLES.

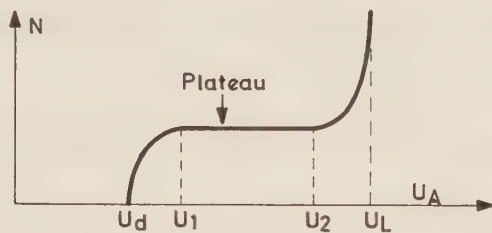
1)- Formation du canal ionisé.



2)- Transformation des avalanches de TOWNSEND en étincelle: (exemples).

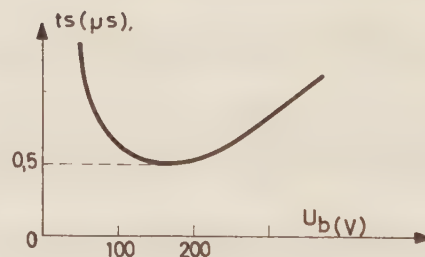


3)- Chambre à étincelles à haute tension continue: Variation du nombre d'étincelles (N) en fonction de la tension U_A appliquée

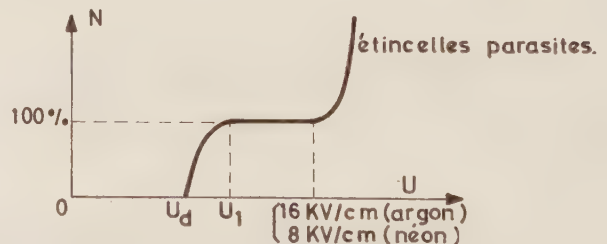


4)- Chambre à étincelles déclenchées:

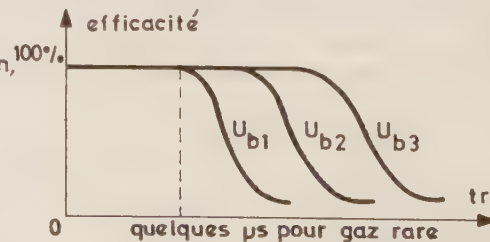
a) Variation du temps de sensibilité (t_s) en fonction de la tension de balayage (U_b).



b) Variation du nombre d'étincelles (N) en fonction de l'amplitude de l'impulsion de tension (U) appliquée.



c) Variation de l'efficacité de la chambre en fonction du retard (t_r) de l'impulsion de tension, pour plusieurs tensions de balayage (U_b).



se produire au bout de quelques avalanches secondaires seulement mais la déformation du champ par les ions est alors exclue par RAETHER ([5] page 142) (voir Pl. 2-2 a).

Si l'absorption du gaz est importante, il n'y a pas d'effets secondaires à partir de la cathode, mais il peut se produire une photoionisation du gaz près de l'anode qui donne des avalanches secondaires non visibles sur les oscillogrammes et ensuite une étincelle après un certain temps ([5] page 140) (voir Pl. 2-2 b).

Application à la chambre étudiée :

La formation de l'étincelle ne se fait donc que pendant le développement d'une avalanche électronique, primaire ou secondaire, et non pendant le temps de migration des ions vers la cathode. L'avalanche a un développement rapide et le signal qu'elle donne est utilisable seulement lorsqu'elle tend vers son maximum. Etant donné le retard qu'apportera l'électronique de déclenchement, celui-ci, ne pourra se faire que sur une avalanche secondaire, c'est-à-dire avec un retard de quelques 10^{-7} s si l'effet secondaire utilisé est l'effet photo électrique, ou de quelques 10^{-5} s si l'effet secondaire utilisé est dû à l'action des ions. La plage de fonctionnement du compteur devra correspondre aux conditions de formation des avalanches secondaires ($U_3 < U_A < U_d$). Par le choix des conditions il faudra éviter la formation de décharges lumineuses.

2.- Fonctionnement avec une tension supérieure à la tension disruptive U_d -

a) Chambres à étincelles à haute tension continue :

D'après la théorie du canal ionisé, le moyen le plus simple pour obtenir une étincelle sur une avalanche, semble être de se placer simplement au-dessus de la tension disruptive ($U_A > U_d$). Des appareils basés sur ce principe ont été étudiés d'abord par KEUFFEL puis dans d'autres laboratoires [7] à [11].

Les décharges au-dessus de la tension disruptive donnent un courant supérieur à 1 ampère et une tension de décharge de quelques dizaines de volts. Si l'alimentation le permettait, il se formerait un arc continu. Les étincelles obtenues sont brèves car elles sont alimentées seulement par la capacité de la chambre qui se décharge. Après l'arrêt de l'étincelle, la recharge de cette capacité se fait par une résistance importante ou un tube de blocage en série dans le circuit d'alimentation. Quand le temps de recharge ou "temps mort" est terminé, la chambre peut fonctionner de nouveau.

Ce temps mort est nécessaire et doit avoir une valeur minimale de l'ordre de 1 ms pour éviter que les résidus de l'étincelle précédente en provoquent une seconde, parasite.

Dans certaines conditions, les étincelles sont provoquées par les particules ionisantes et se forment à leur point de passage. Le nombre d'étincelles obtenues varie avec la haute tension. (voir Pl. 2-3). La zone d'utilisation correspondant au plateau de comptage peut dépasser un millier de volts pour des tensions de quelques milliers de volts.

$U_d < U_A < U_1$: l'étincelle ne se fait qu'avec une certaine probabilité à partir de l'avalanche.

$U_1 < U_A < U_2$: chaque avalanche donne une étincelle.

$U_2 < U_A$: les étincelles parasites de plus en plus nombreuses rendent la chambre inutilisable.

L'étincelle est en général localisée au point de passage de la particule mais certaines dispersions peuvent se produire d'après HENNING P.G. [10]

- une faible dispersion (0,8 mm, pour 78 % des cas) correspond au fonctionnement normal

- une dispersion moyenne (7 mm, pour 17 % des cas) correspond aux étincelles formées seulement à partir de la première avalanche secondaire quand la haute tension est légèrement faible.

- il n'y a pas de localisation (dans 5 % des cas) quand les étincelles se font après de multiples avalanches avec une haute tension trop faible.

Remarque : Ce problème de dispersion risque de se poser dans la chambre étudiée puisque l'étincelle se fera sans doute sur une avalanche secondaire.

Ces chambres peuvent avoir un rendement de 1 pour les cosmiques mais les différents auteurs ne les ont jamais utilisées au-dessus de quelques étincelles par seconde. Elles sont très simples de principe, mais leurs performances limitées et surtout les très grandes difficultés de fabrication et d'emploi les ont fait abandonner dans la plupart des cas. Des essais sont faits cependant pour les utiliser en électronique médicale [12] [13]. Le fait de travailler à une tension nettement supérieure à la valeur U_d entraîne que chaque défaut des électrodes, chaque ionisation parasite même faible sont des sources d'étincelles parasites. Ces difficultés ont été tournées avec l'emploi des chambres à étincelles déclenchées.

b) Chambre à étincelles déclenchées :

Les chambres précédentes donnent des difficultés car elles travaillent toujours au-dessus de la tension disruptive et elles ne sont coupées que temporairement après une étincelle.

Pour éviter ces inconvénients, les chambres à étincelles déclenchées ont une tension permanente très faible utilisée simplement pour balayer les ions produits par les étincelles. La haute tension nécessaire aux étincelles est appliquée, sous forme d'impulsion brève, uniquement au moment opportun. Un système de temps mort toujours nécessaire évite qu'elle soit appliquée de nouveau, trop tôt après une étincelle. Mais elles nécessitent un détecteur et une électronique extérieurs pour commander l'impulsion de tension et, de ce fait, elles ne peuvent servir qu'à l'étude des rayonnements de haute énergie qui ne sont pas perturbés par ce détecteur.

Après les premiers essais de CRANSHAW T.E. et de DE BEER J.F. [14] et de FUKUI S. et MIYAMOTO S. [15], ces chambres se sont rapidement développées et, avec l'amélioration de la technique de déclenchement, elles sont devenues un outil pratique et sûr pour la détection des particules de haute énergie. Les comptes rendus de diverses conférences [16] à [18] donnent une idée de leurs caractéristiques. Des études sur le mécanisme de la formation de l'étincelle dans ces chambres ont été faites à la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse sous la direction du Professeur D. BLANC [19].

La surface peut dépasser le mètre carré et la distance interélectrodes est de quelques millimètres, sauf pour certains types. Les électrodes sont en général métalliques. Avec des électrodes en verre, conductrices extérieurement, et du néon, il est possible d'obtenir plusieurs étincelles simultanées.

La localisation est précise : erreur moyenne de 0,2 mm pour une étincelle ou de 1 mm pour plusieurs étincelles simultanées.

Les compteurs Geiger-Muller, puis des ensembles scintillateur et photomultiplicateur associés à une électronique de déclenchement, donnent une réponse rapide ; le retard de 250 à 300 ns avec amplificateur et thyatron devient inférieur à 100 ns avec amplificateur, transistor avalanche, EFP 60 et éclateur [20].

Remarque : Etant donné les temps de formation des effets secondaires, une électronique de performances analogues à celles-ci serait suffisante pour l'appareil étudié.

Pour donner un bon fonctionnement, l'impulsion de tension doit avoir un temps de montée de 10^{-8} s et une constante de temps de descente de l'ordre de $0,5 \mu\text{s}$; le temps mort, écart entre deux impulsions successives, doit être de l'ordre de 10 ms.

Le temps de sensibilité, t_s , temps après le passage de la particule, pendant lequel l'étincelle peut être déclenchée et localisée, dépend du champ de balayage et de la nature du gaz. ([16] page 273) (voir Pl. 2-4-a).

avec N_2 , CO_2	$t_s < 100 \mu\text{s}$
Ne, H, A	$t_s < \text{quelques } \mu\text{s}$

L'efficacité est de 100 % avec des champs de l'ordre de 8 kV/cm pour le néon et de 16 kV/cm pour l'argon, sur une plage de tension de quelques kilovolts. Les étincelles parasites de l'ordre de 1 % deviennent très nombreuses au-dessus de cette plage. (voir Pl. 2-4-b). L'efficacité diminue lorsqu'on arrive à la limite du temps de sensibilité (voir Pl. 2-4-c). Pour être maximale, elle nécessite aussi une certaine pression et une certaine distance entre électrodes ([16] page 175).

$d > 1 \text{ mm}$ pour CO_2 $d > 7 \text{ à } 8 \text{ mm}$ pour Ne.A... $p \geq 300 \text{ mm Hg}$ environ

De plus, si la pression est trop faible, la décharge devient diffuse.

Autres types de chambres déjà essayées :

Des essais ont déjà été faits pour adapter les chambres déclenchées à la détection des particules de faible énergie. CHARPAK et MASSONET [21] ont fait une chambre commandée avec des impulsions de tension récurrentes légèrement supérieures à U_d et durant jusqu'à 10 ms; ils ont ainsi obtenu quelques images de traces. YASUMI et ses collaborateurs [22] ont commandé leur chambre par l'intermédiaire d'un photomultiplicateur qui percevait la lumière de la scintillation donnée par la particule dans le gaz de la chambre.

Dans une autre voie, des chambres déclenchées pour particules de haute énergie ont été employées par TRUMPER avec une tension de repos, sur les électrodes, correspondant au régime d'avalanche [23]. L'impulsion de haute tension, déclenchée par un dispositif extérieur à la chambre, est appliquée avec un retard minimal de $0,5 \mu\text{s}$. Si la tension de repos est assez proche de U_d et si la tension au moment de l'impulsion de commande est de l'ordre de 2 à 3 U_d , il se produit une étincelle, localisée près du point de passage de la particule, avec un rendement de l'ordre de 1. Le rendement est important avec des retards allant jusqu'à $4 \mu\text{s}$, il est encore de 10 % pour un retard de 13 μs . Dans plus de 90 % des cas, la précision de la localisation est de 0,2 mm; dans les autres cas, la dispersion moyenne est de l'ordre de 5 mm. Le remplissage, à 500 torr, étant fait avec un mélange argon acétone, l'origine de la plupart des étincelles est attribuée à la libération d'électrons par les ions négatifs d'acétone formés pendant l'avalanche. Les étincelles qui donnent une plus grande dispersion sont attribuées aux électrons des avalanches secondaires formées par effet photoélectrique sur la cathode.

Remarque : Des essais de déclenchement d'étincelles ont été faits également avec des signaux haute fréquence de haute tension [24] [25].

3 - Conclusion -

D'après cette étude sommaire des phénomènes électriques de décharges dans les gaz et des chambres à étincelles, il semble possible de commander à partir de l'avalanche primaire créée par une particule, une impulsion de haute tension qui puisse déclencher une étincelle sur une avalanche secondaire. Si l'étincelle se déclenche au voisinage du point de passage de la particule, un appareil basé sur ce principe semble le plus efficace pour détecter et visualiser par étincelles les émetteurs de faible énergie.



2 - RECHERCHES EXPERIMENTALES PRELIMINAIRES

a) Appareillage utilisé :

Chambre (voir Pl. 3)

Le montage est fait dans un dessiccateur en verre auquel est ajouté un robinet et des passages de courant. Les électrodes sont formées de deux plateaux en laiton de diamètre 80 mm et d'épaisseur 3 mm dont les bords sont arrondis. L'intervalle est réglable, entre 1 et 14 mm, de l'extérieur, par un aimant agissant sur des masselottes de fer; le parallélisme est de l'ordre de 0,1 mm. La distance entre les électrodes et la partie inférieure de l'enceinte est de 80 mm. La construction est propre mais sans polissage poussé ni traitement spécial. Le remplissage du gaz se fait après un vide de l'ordre de 10^{-2} mm Hg sans dégazage.

Electronique (voir Pl. 4-1)

L'observation des signaux d'étincelles est faite directement avec un oscilloscope. L'observation des signaux d'avalanches est faite par l'intermédiaire d'un "cathode follower" ($Z_s = 100 \Omega$). Les comptages et les mesures d'amplitude des impulsions d'avalanches sont faits avec une échelle placée après une chaîne d'amplification et un "seuil de comptage".

Remarque : Les sources radioactives utilisées pour faire cette étude sont en ^{137}Cs qui donne des γ de 660 keV.

1.- **Fonctionnement en compteur proportionnel**

Tension d'emploi :

Le régime proportionnel est obtenu quand la tension appliquée, U_A , est légèrement inférieure à la tension disruptive U_d , mais la valeur de cette tension et la plage utile de fonctionnement varient beaucoup avec le gaz employé.

néon : U_d est de l'ordre de 600 V ($d = 3$ mm $p = 700$ mm Hg)

néon : U_d est de l'ordre de 1000 V ($d = 6$ mm $p = 700$ mm Hg)

argon : U_d est de l'ordre de 2000 V ($d = 3$ mm $p = 700$ mm Hg)

argon : U_d est de l'ordre de 2000 V ($d = 6$ mm $p = 100$ mm Hg)

argon méthane : 6000 V ($d = 5$ mm $p = 1$ atmosphère)

Avec les gaz purs néon et argon, la plage utile est de quelques dizaines de volts; avec le mélange argon méthane, elle est de quelques centaines de volts.

a) Caractéristiques des impulsions obtenues :

Forme des impulsions sans effets secondaires :

La forme générale des impulsions, sans effets secondaires, a la même allure pour tous les gaz : un pic dû à l'avalanche électronique est suivi d'un plateau donné par la migration des ions. La durée, par contre, varie avec le gaz employé.

néon : la durée est de 20 μs ($d = 3$ mm $p = 700$ mm Hg)

argon : la durée est de 10 μs à 15 μs ($d = 3$ mm $p = 700$ mm Hg)

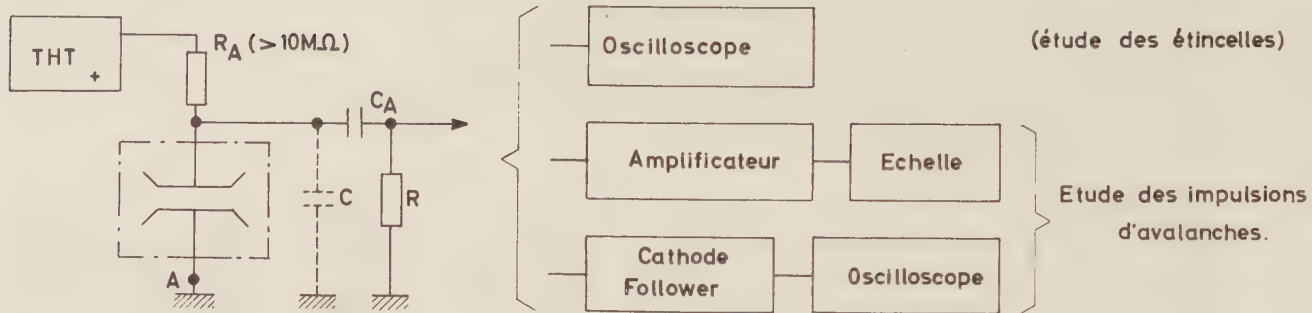
argon méthane : la durée est de 15 μs ($d = 6$ mm $p = 100$ mm Hg)

: la durée est de 20 μs à 30 μs ($d = 5$ mm $p = 1$ atmosphère)

Ces différences sont dues à la variation de la mobilité des ions avec la nature du gaz. La vitesse des ions évaluée en divisant la distance parcourue par le temps de migration des ions et la mobilité déduite de cette vitesse, correspondent assez bien aux valeurs données par LOEB [3].

DISPOSITIF ELECTRONIQUE D'ETUDE SIGNAUX D'AVANCHES ET D'ETINCELLES.

1. Electronique.



_THT: ALS 349.

_Oscilloscope: tektronix type 545.

_ Amplificateur: préamplificateur: TAMP1 modifié (sortie sur "cathode follower" $Z_s = 100 \Omega$).

- + amplificateur: TAP 10 000.

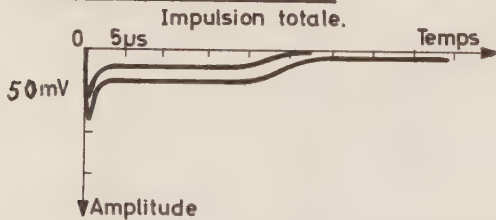
- gain total: 12 500.

- bruit de fond: 1V.

_Pour l'étude des impulsions obtenues dans l'argon méthane à une atmosphère le point A est réuni à une THT négative

_Echelle: TU 2 + T2 D1 + TND1

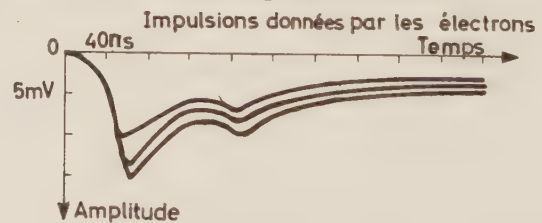
2. Signaux d'avalanches : avec remplissage de 1 atmosphère d'argon méthane.



- $d = 5 mm$. - $R = 10 K\Omega$.

- $U_d = 5980 V$. - $C_A = 300 pF$.

- $U_A = U_d - 50 V$.

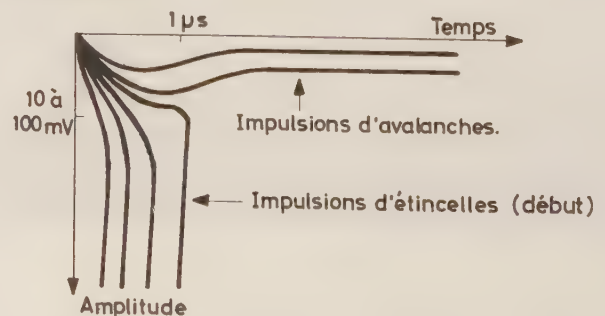
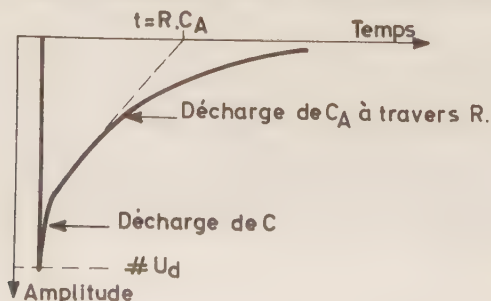


- $d = 5 mm$. - $R = 1 K\Omega$.

- $U_d = 6000 V$. - $C_A = 300 pF$.

- $U_A = U_d - 100 V$.

3. Signal d'étincelle et début du signal d'étincelle



Lorsque la distance entre électrodes est de quelques millimètres, et la pression du gaz de l'ordre de 1 atmosphère, les mobilités trouvées sont de l'ordre de :

$1,5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des valeurs de E/p comprises entre 10 et $20 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mm Hg}^{-1}$ dans l'argon
 $4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des valeurs de E/p comprises entre 5 et $10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mm Hg}^{-1}$ dans le néon

Lorsque la pression diminue ou que l'espace interélectrodes augmente, la vitesse des ions mesurée dans le néon semble plus importante et dépasse $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Impulsions avec effets secondaires

Lorsque la tension U_A approche de la valeur U_d , l'influence des effets secondaires sur la forme des impulsions varie beaucoup avec le gaz.

Avec les gaz purs néon et argon, les impulsions sont complètement déformées.

Avec le mélange argon méthane, la forme de l'impulsion ne varie pas beaucoup mais le temps de montée du pic donné par les électrons est allongé de 0,2 à $1 \mu\text{s}$; cela est dû à des avalanches secondaires données par les photons. Des mesures faites ultérieurement avec un remplissage de une atmosphère d'argon méthane montrent qu'il y a d'abord un pic principal dû à l'avalanche primaire, puis, quand la haute tension augmente, des pics secondaires. L'intervalle entre 2 pics consécutifs est de l'ordre de 120 ns; il correspond au temps de transit des électrons dans l'espace interélectrodes. Il n'y a pas d'effets secondaires visibles donnés par les ions. (voir Pl. 4-2).

b) Comptages obtenus : rendement

L'amplitude des impulsions recueillies croît avec la valeur de la résistance de charge R et avec celle de la capacité de liaison C_A .

La courbe de discrimination des impulsions a une allure exponentielle décroissante vers les hautes amplitudes (voir Pl. 5-1).

La courbe de comptage, en fonction de la tension U_A , des impulsions dépassant un seuil fixe, croît de manière continue avec la tension (Pl. 5-2). Certains auteurs [6] ont obtenu avec un appareil de même principe un plateau de comptage de 100 V avec une pente de 4 % pour une haute tension de 3000 V; cependant le remplissage était fait avec un mélange de vapeur éliminant les effets secondaires et l'amplificateur avait un gain de 10^5 .

Les rendements obtenus varient avec la nature du gaz utilisé pour le remplissage. Etant donné la forme de la courbe de discrimination et de la courbe de variation de comptage en fonction de la tension U_A , les rendements mesurés ne sont qu'approchés.

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus dans les conditions suivantes :

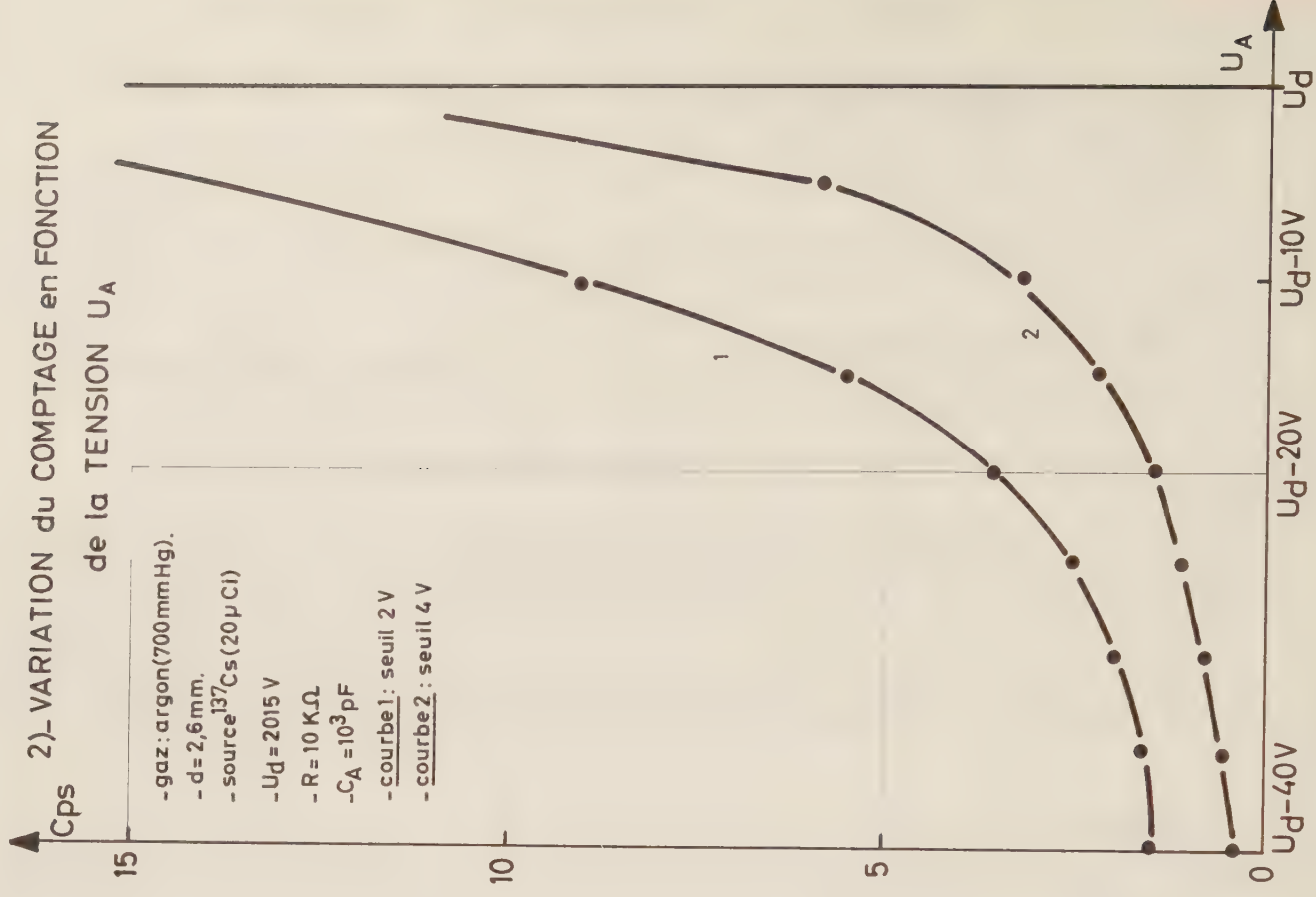
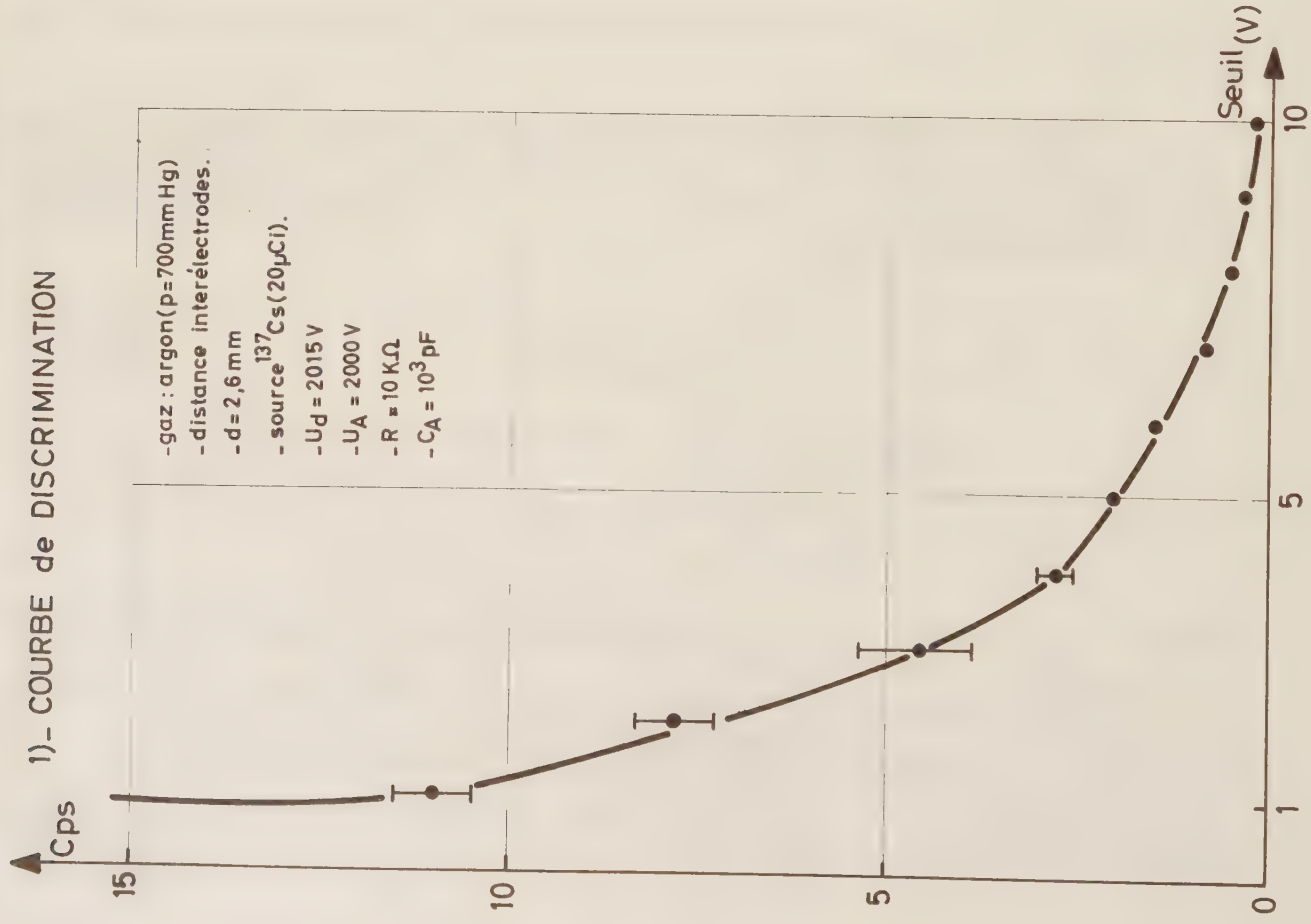
Conditions : $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C_A = 10^3 \text{ pF}$ amplification : 12500.

Seuil de discrimination : 2 V
 $d = 6 \text{ mm}$ $U_A = U_d - 10 \text{ V}$

Résultats : Les rendements obtenus avec l'argon pur et le néon pur sont semblables, ils sont plus importants avec l'argon méthane.

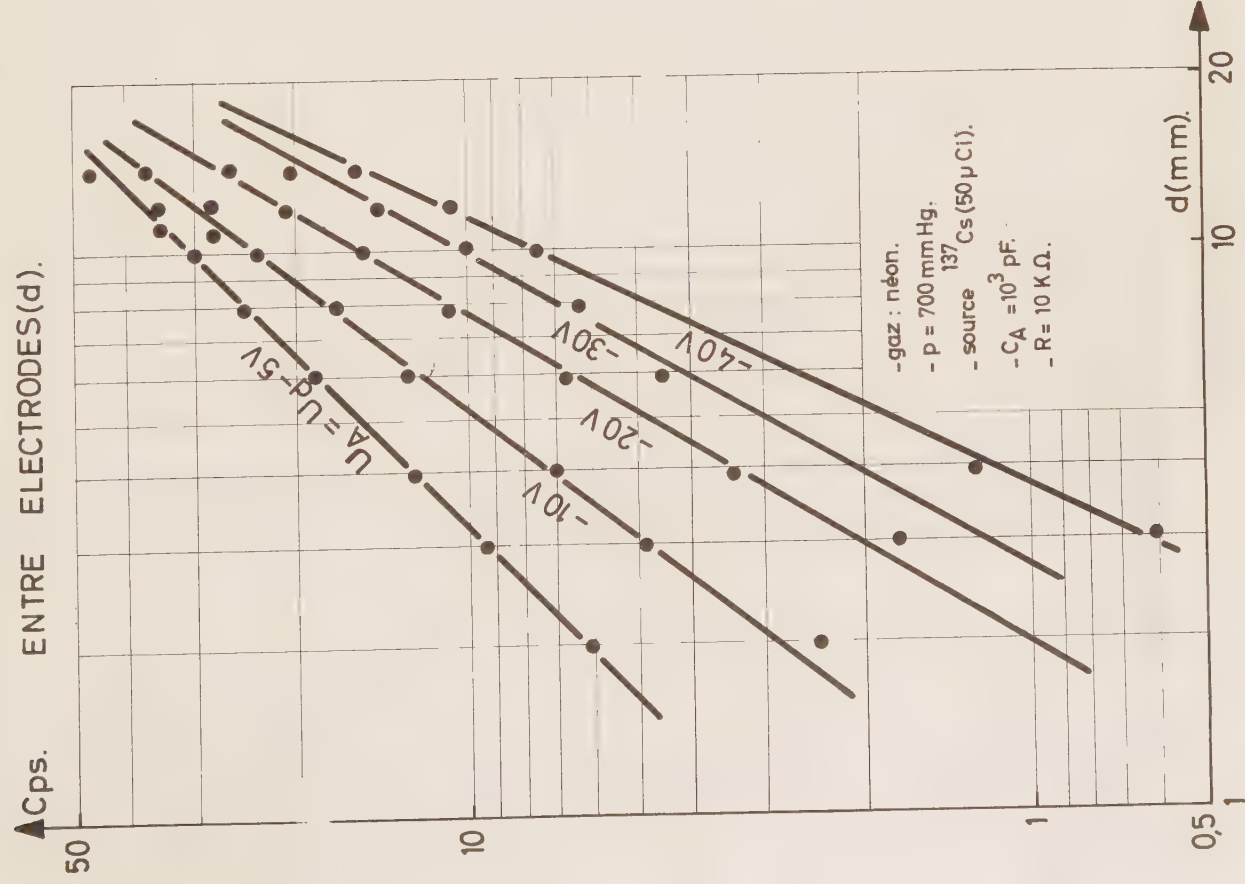
remplissage	U_d	Bruit de fond	comptage avec source de ^{137}Cs
argon méthane ($p = 100 \text{ mm Hg}$)	2060 V	4 cps	175 cps avec source de $50 \mu \text{ Ci}$
néon pur ($p = 700 \text{ mm Hg}$)	1000 V	1 cps	13 cps avec source de $20 \mu \text{ Ci}$

IMPULSIONS D'AVALANCHES.

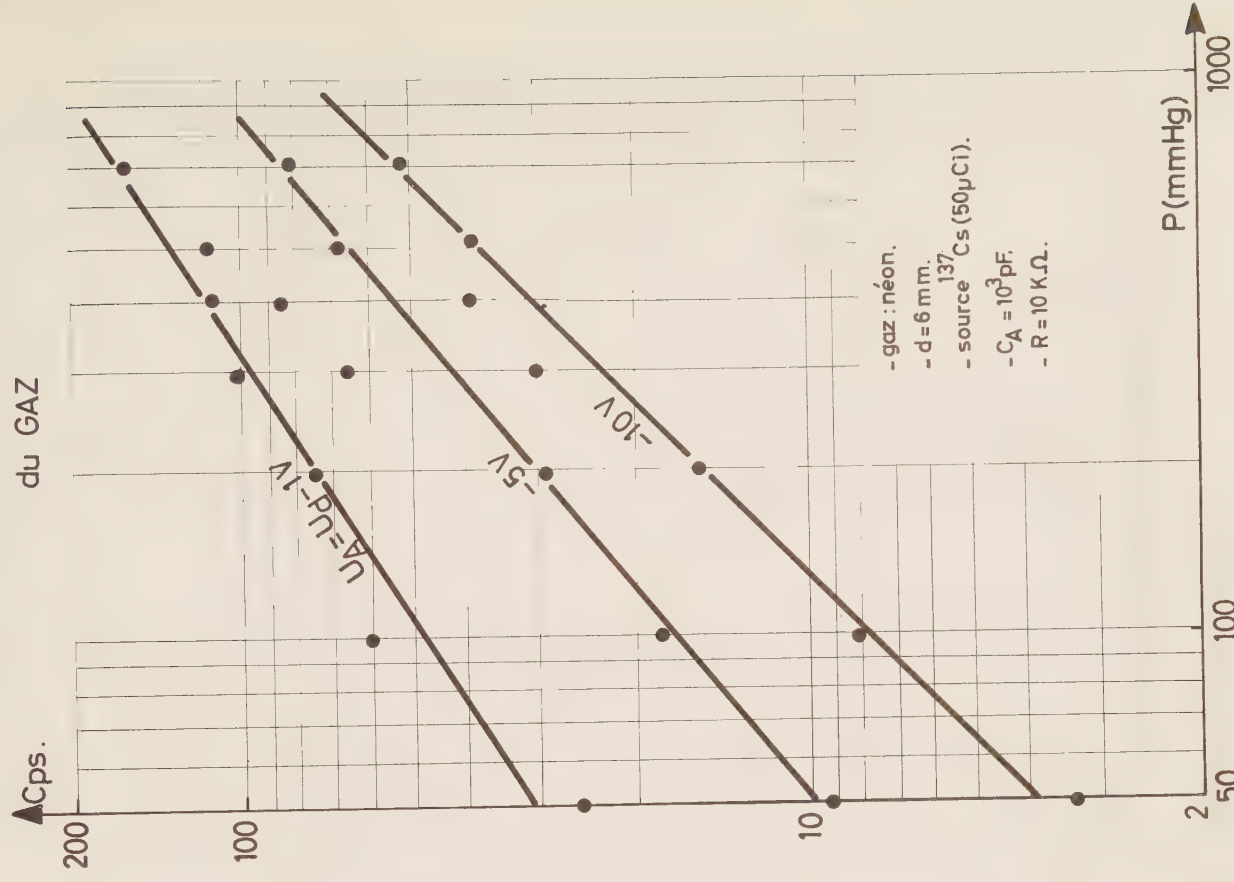


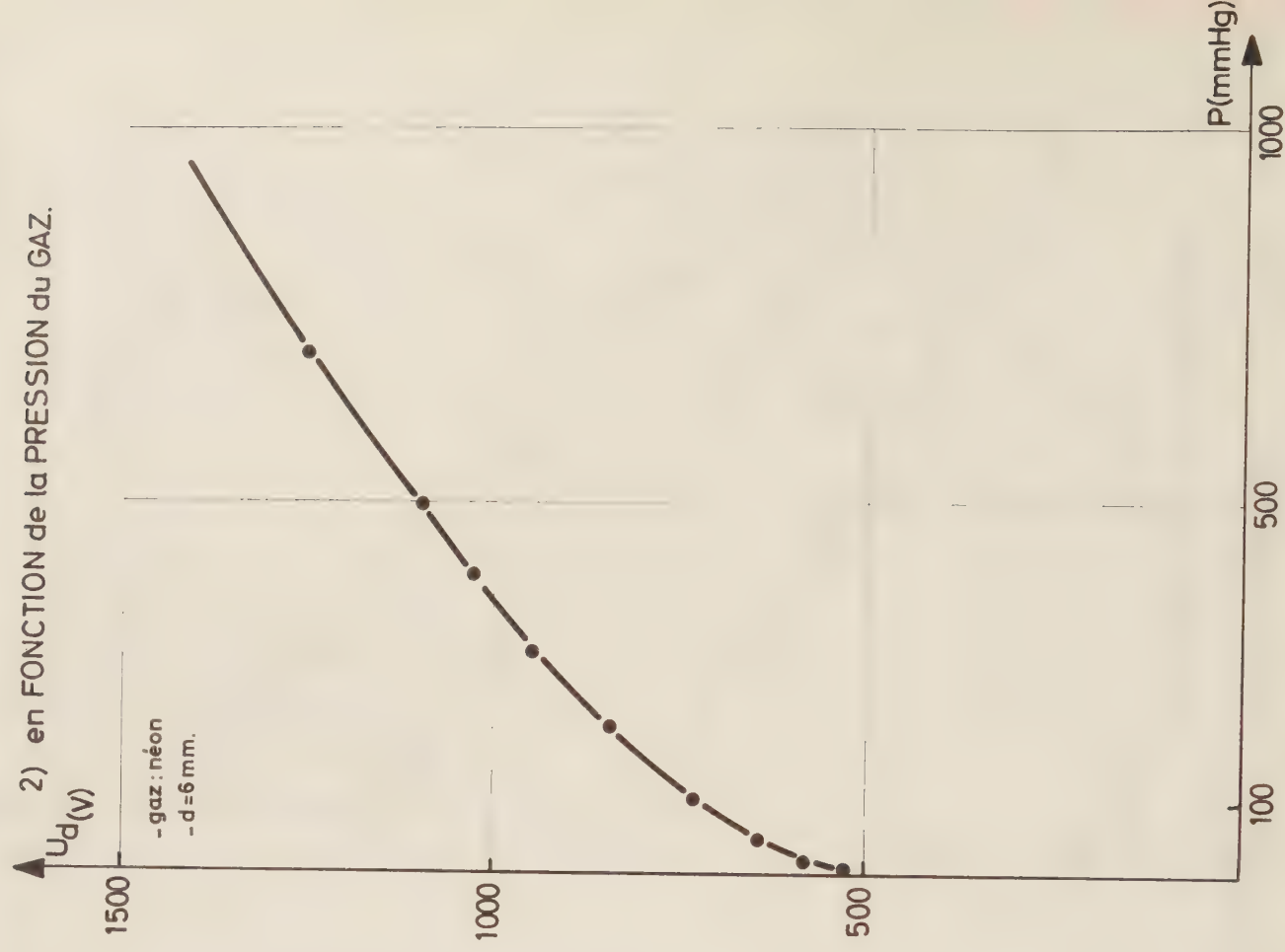
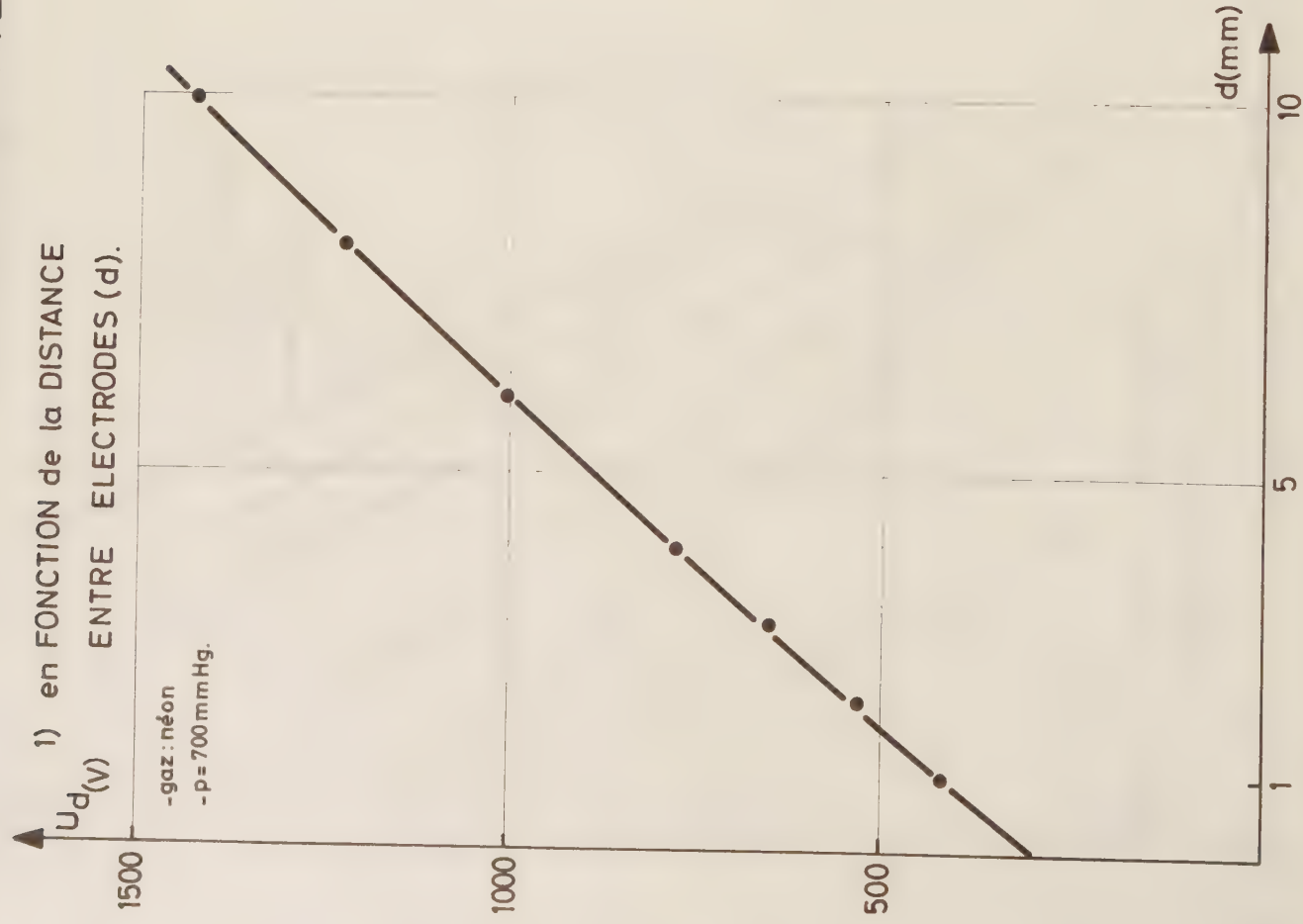
VARIATIONS du NOMBRE d'IMPULSIONS d' AVALANCHES

1) en FONCTION de la DISTANCE ENTRE ELECTRODES(d).



2) en FONCTION de la PRESSION du GAZ.



VARIATION de la TENSION DISRUPTIVE (U_d).

Le coefficient de transmission de la paroi en verre de l'enceinte et du plateau inférieur du compteur est environ 64 %. Le rendement donné par l'angle solide sous lequel est vu le compteur à partir de la position de la source est de 5,3 %. Le nombre de rayonnements traversant le compteur est donc de l'ordre de :

21.10³ cps pour une activité de 20 μ Ci

52.10³ cps pour une activité de 50 μ Ci

Les rendements de détection obtenus sont donc de l'ordre de 3 à 4.10⁻³ avec un remplissage d'argon méthane et de 6.10⁻⁴ avec un remplissage de néon (ou d'argon) pur.

L'ionisation primaire du gaz est donnée surtout par les β d'énergie maximale de 480 keV résultant de l'effet des γ de 660 keV du ¹³⁷Cs dans la cathode. L'absorption des γ de 660 keV dans une épaisseur de métal - assimilé à du cuivre qui a un coefficient d'absorption μ de 0,075 g/cm² pour 660 keV, ([33] page 864) - correspondant au parcours des β de 480 keV soit 160 mg/cm², donne une approximation du rendement de détection qui est de l'ordre de 1,2 %.

Donc, avec un remplissage à 1 atmosphère fait avec un gaz rare, le rendement obtenu est en général inférieur à 10 % du rendement théorique. Avec un remplissage fait avec de l'argon méthane à la pression de 100 mm Hg, le rendement est déjà de l'ordre de 30 % du rendement théorique.

Ces résultats sont en accord avec ceux publiés par les auteurs [6], qui obtiennent le rendement théorique pour les mélanges avec vapeurs et 2 à 3 % du rendement théorique pour les gaz purs. C'est la conséquence de l'effet d'absorption des vapeurs qui permet d'augmenter la haute tension et d'obtenir des avalanches plus importantes.

c) Influence de différents paramètres sur le fonctionnement en compteur :

Les variations de la pression du gaz et de la distance entre les électrodes ont des effets analogues; il ne semble pas cependant que les caractéristiques du compteur dépendent du seul produit p.d. La tension disruptive croît avec la pression et avec la distance (voir Pl. 7).

Le comptage, dans des conditions analogues par rapport à U_d, ainsi que la durée des impulsions, croissent également. (Pl. 6).

La lumière, en général, n'a pas d'influence nettement visible sur le fonctionnement aussi bien avec un gaz rare, néon ou argon, qu'avec le mélange argon méthane. La température joue peu avec les mélanges argon méthane et beaucoup avec les gaz rares : la tension disruptive croît avec la température ainsi que le comptage dans des conditions analogues par rapport à U_d.

La nature des électrodes ne semble pas avoir d'influence avec les matériaux essayés : laiton, aluminium, bronze, acier inoxydable.

Le compteur, lorsqu'il est rempli avec un gaz rare, est très sensible aux impuretés; une certaine quantité semble même nécessaire pour que le fonctionnement soit correct; en effet le montage rempli avec un gaz rare ne fonctionne correctement qu'un certain temps après le remplissage.

L'évolution des caractéristiques et du rendement est assez rapide.

Lorsque le remplissage est fait avec le mélange argon-méthane, le compteur n'est pas très sensible aux impuretés :

Il donne un fonctionnement correct aussitôt après le remplissage. L'évolution est plus lente; un montage, quand il n'y a pas d'étincelles, peut durer quelques semaines. Avec le temps, la tension disruptive croît et le comptage dans des conditions analogues par rapport à U_d décroît.

2.- Fonctionnement en chambre à étincelles :

Lorsque la tension appliquée, U_A , dépasse la tension disruptive, U_d , les étincelles apparaissent; leur nombre augmente avec la tension U_A mais la courbe du nombre d'étincelles en fonction de cette tension ne présente pas de palier analogue à celui des chambres à haute tension continue déjà signalées (II-1 2-a). Cela est dû au fait que l'appareil a été fait sans les précautions de construction spéciales nécessaires pour ces chambres.

Lorsque la tension U_A est voisine de la valeur U_d , les étincelles données par une source se détachent des étincelles parasites, mais le rendement est environ le dixième de celui en avalanches; quand la tension U_A augmente, les étincelles utiles sont rapidement noyées dans les parasites.

Quelquefois, les étincelles dues à des particules commencent à une tension très légèrement inférieure à celle où débutent les étincelles parasites, mais ce phénomène est rare et trop bref pour être étudié.

a) Influence de différents paramètres sur le fonctionnement :

Influence du circuit électrique

Le signal électrique de l'étincelle, observé sur l'anode, est formé d'une descente rapide suivi d'une remontée d'allure exponentielle. L'amplitude de l'impulsion de tension est constante, un peu inférieure à U_A . Il se produit parfois des instabilités dans la forme, et des formes complexes qui varient avec les conditions expérimentales.

L'étincelle peut être considérée comme un court-circuit entre les plateaux qui donne une décharge directe de C et une décharge de C_A à travers R qui se fait avec une constante de temps $\tau = C_A.R.$ (voir Pl. 4-3).

Une augmentation des capacités C_A et C produit des étincelles plus bruyantes et plus brillantes. Les variations de la résistance R dans la plage utilisée pour le fonctionnement en compteur, - 1 à 10 k Ω -, ne jouent pas sur l'aspect des étincelles. La résistance R_A ne joue que sur le temps mort, c'est-à-dire sur le taux maximal de répétition des étincelles; elle doit être supérieure à une certaine valeur critique, de l'ordre de 10 M Ω , sinon il se forme une suite d'étincelles parasites.

Influence de la distance entre électrodes, de la pression et de la nature du gaz

Si la distance entre électrodes, d, devient trop grande ou la pression du gaz, p, trop faible, les étincelles fines se transforment en décharges lumineuses larges et mal définies (décharges lumineuses). Les valeurs critiques de p et de d dépendent du gaz employé.

néon	(avec p = 700 mm Hg)	d critique de l'ordre de 10 mm
	(avec d = 3 mm)	p critique de l'ordre de 100 mm Hg
argon	(avec d = 3 mm)	p critique de l'ordre de 60 mm Hg
argon méthane	(avec d = 3 mm)	p critique de l'ordre de 20 mm Hg

Les étincelles sont roses dans le néon et bleues dans l'argon et l'argon méthane.

b) Formation de l'étincelle :

L'impulsion de décharge se forme à partir des plus grandes impulsions d'avalanches et d'autant plus rapidement que la tension U_A est plus grande au-dessus de U_d .

La formation de la décharge se fait pendant la durée des avalanches électroniques. (voir Pl. 4-3).

c) Répercussion des étincelles sur le fonctionnement en compteur

Les étincelles produisent un phénomène "d'hystérésis" pour la valeur de la tension disruptive U_d : en augmentant la tension U_A , la tension U_d a une valeur V_1 ; après fonctionnement en régime d'étincelles, en diminuant la tension U_A , la tension U_d a une valeur V_2 : $V_2 < V_1$.

L'importance de ce phénomène augmente avec le temps de fonctionnement en régime d'étincelles et avec le taux d'étincelles.

Si on fait deux essais de fonctionnement en compteur dans des conditions identiques avant et après un fonctionnement en chambre à étincelles, à partir d'un taux de quelques étincelles par seconde, le comptage dans le deuxième cas est plus important que dans le premier. La différence n'est pas due à des impulsions parasites mais provient d'une plus grande sensibilité de la chambre.

3 - CONCLUSIONS SUR LE FONCTIONNEMENT D'UN MEME APPAREIL EN REGIME D'AVANCHES ET EN REGIME D'ETINCELLES

Il est possible de faire un appareil ayant des caractéristiques de compteur proportionnel satisfaisantes, d'une manière assez simple avec une construction soignée mais sans précaution ni traitement spéciaux. Le remplissage peut se faire après un vide peu poussé, de l'ordre de 10^{-2} mm Hg, sans dégazage à chaud.

Le déclenchement des étincelles à partir des impulsions d'avalanches semble possible. En effet, avec une alimentation continue, dans des conditions normales d'utilisation, les étincelles se forment à partir des impulsions d'avalanche avec un retard plus ou moins long, pouvant aller jusqu'à des valeurs de l'ordre de $1 \mu s$. Les étincelles semblent produites, dans ces conditions, uniquement à partir des effets secondaires dus aux photons. Il faudrait que ces étincelles puissent être localisées au point de passage de la particule ionisante.

Le gaz employé doit être un mélange contenant une vapeur car, avec un gaz pur, le rapport entre le nombre d'impulsions de compteur détectables et le nombre de particules ayant donné des effets ionisants est trop faible (entre 1 et 10 %). Par contre, avec un mélange, le rapport peut atteindre 100 %. Les essais seront faits avec le mélange standard utilisé dans les compteurs proportionnels : argon U : 90 %, méthane 99,9 : 10 %.

Le rendement de détection d'un tel compteur, s'il est appréciable pour les β , est faible pour les γ qui sont détectés par effet de paroi (de l'ordre de 1 % pour le Cs^{137}) et très faible pour les X. En effet, seuls les X détectés dans le gaz au voisinage immédiat de la cathode donnent des avalanches importantes car l'amplification varie rapidement avec l'endroit de l'ionisation primaire. (II-1-1-a).

Une distance de l'ordre de 5 mm entre les électrodes paraît correcte. Pour obtenir le rendement théorique, la pression doit avoir une certaine valeur minimale de l'ordre de 100 mm Hg; cette pression est nettement supérieure à la pression critique donnant les décharges luminescentes. Une augmentation de la pression est intéressante pour le rendement, mais elle entraîne une augmentation de la tension de décharge, et donc de la tension de travail utilisée; celle-ci est de 2000 V pour $d = 6$ mm, $p = 100$ mm Hg, avec l'argon méthane.

Cette valeur est compatible avec les THT disponibles qui donnent au maximum 2500 ou 3000 V. Les valeurs des paramètres électriques doivent être des compromis :

La résistance R_A d'anode doit être supérieure à la valeur critique (de l'ordre de 10 M Ω) qui donne des suites de décharges parasites à cause du temps mort insuffisant mais elle ne doit pas être trop importante pour ne pas limiter le taux d'étincelles utiles.

La résistance de charge R ne doit pas être trop forte ($R < 10\text{ k}\Omega$) pour ne pas trop intégrer le signal et permettre une réponse rapide; elle ne doit pas être trop faible pour que les signaux de tension obtenus soient d'amplitude suffisante

L'amplitude du signal recueilli diminue aussi avec la capacité de liaison C_A ; par contre l'importance des étincelles et les perturbations qu'elles apportent croissent avec C_A

L'électronique utilisée doit être assez rapide, le temps de réponse doit être de l'ordre de quelques 10^{-7} s et l'amplification suffisante pour permettre d'utiliser des signaux de l'ordre de 10^{-4} A ; l'électronique doit enfin ne pas être perturbée par les impulsions d'étincelles de quelques kilovolts.

III - RECHERCHE DES POSSIBILITES DE DECLENCHEMENT D'UNE CHAMBRE A ETINCELLES DESTINEE A DETECTER DES RAYONNEMENTS DE FAIBLE ENERGIE

Généralités

Ce chapitre résume les essais effectués en vue de déclencher une étincelle localisée par une impulsion de compteur. Il s'agit de commander, à partir du signal de l'avalanche primaire, une impulsion de haute tension sur la chambre, pour obtenir la formation d'une étincelle sur une avalanche secondaire. Les étapes franchies pour arriver à ce résultat sont données avec l'influence des différents paramètres. Les essais de déclenchement sont d'abord faits avec une pression de remplissage de 100 mm Hg avec des impulsions de haute tension, d'amplitude, de durée et de retard variables. Les essais sont ensuite effectués à la pression atmosphérique pour obtenir un rendement et une localisation meilleurs. Une électronique à tubes et une autre à transistors sont essayées ainsi qu'une chambre à 3 électrodes utilisée pour obtenir un rendement satisfaisant pour les particules X. Les performances et le rendement que peut donner cet appareil sont liés à la technologie de construction et aux qualités de l'électronique.

Caractéristiques demandées à l'électronique

La chambre fournit à l'électronique un signal de commande pouvant descendre jusqu'à 10^{-7} A; avec une résistance de charge de 1 à 10 k Ω , l'amplitude minimale est de 0,1 à 1 mV. L'électronique doit appliquer à la chambre, dans un délai suffisamment court après l'apparition de ce signal, une impulsion de haute tension convenable. L'étincelle se produit alors avec un courant de quelques ampères et une impulsion de tension de plusieurs kilovolts sur la résistance de charge. Une résistance d'anode correcte empêche alors la formation d'une suite d'étincelles parasites; ce système de temps mort qui n'est sans doute pas le meilleur sera employé pour sa simplicité. Mais l'étincelle ne doit pas influencer l'électronique en lui fournissant des signaux supplémentaires parasites. Cette électronique doit donc détecter un signal pouvant être inférieur au millivolt et bloquer, rapidement après, un signal de plusieurs kilovolts. Ce blocage ne peut se faire avant l'amplificateur. Il faut donc, après l'amplificateur, un système de blocage donnant un temps mort suffisant et, avant l'amplificateur, un système de protection ou limiteur qui arrête les surtensions sans trop affaiblir les signaux utiles faibles. Pour que le signal de haute tension appliqué à la chambre ne soit pas affaibli par le limiteur, il doit être appliquée sur l'électrodes opposée à celle fournissant le signal de compteur, d'où le bloc diagramme pour l'électronique donné (Pl. 8-1).

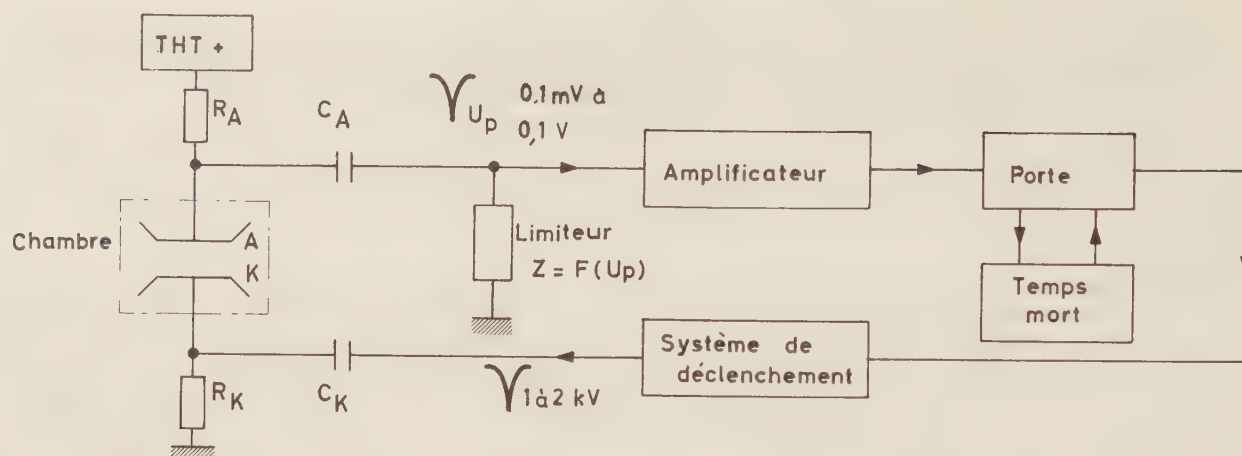
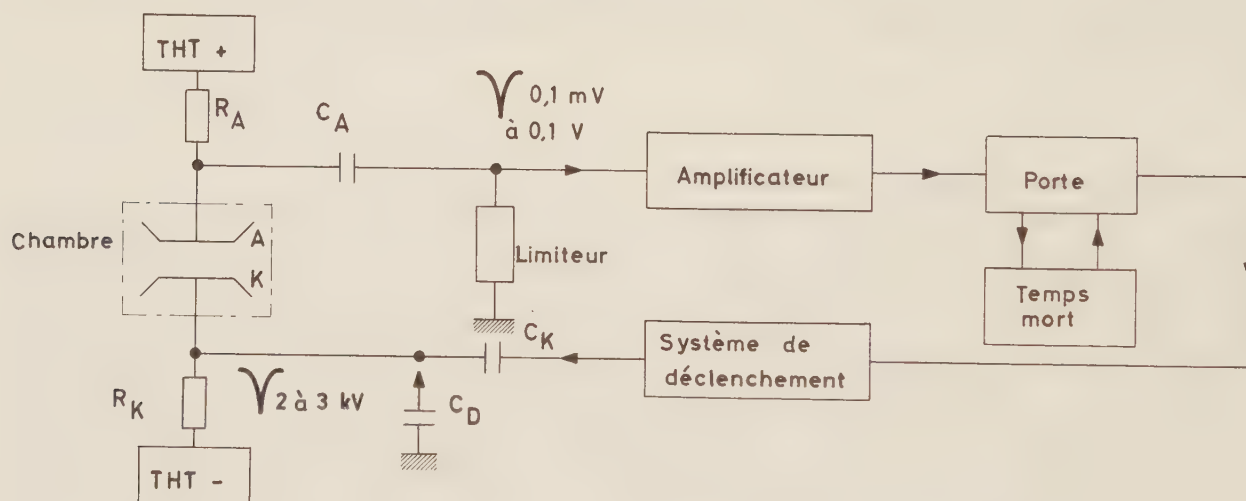
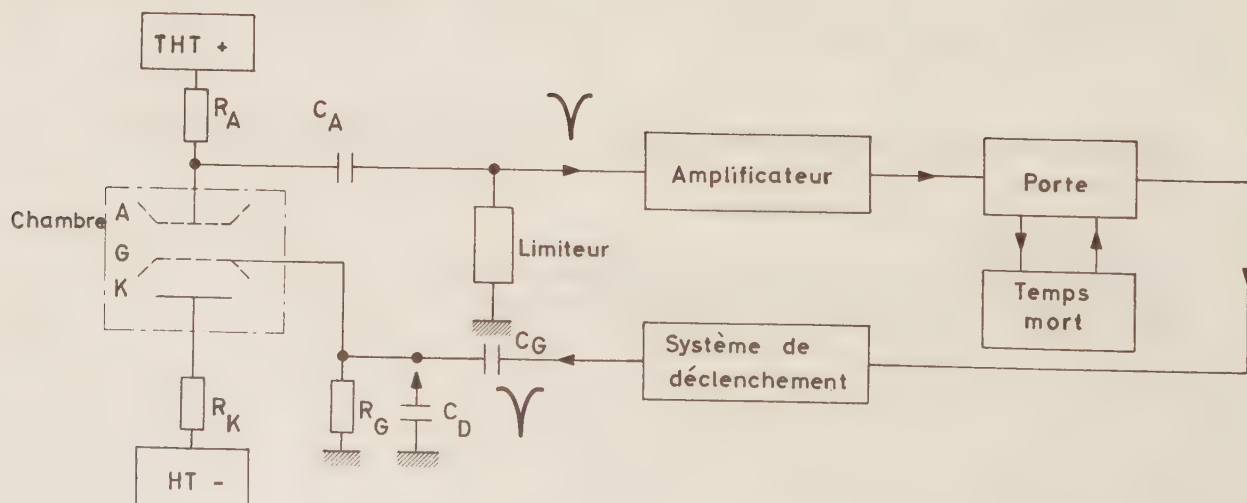
1 - PREMIERS RESULTATS DE DECLENCHEMENT ET DE LOCALISATION A LA PRESSION DE 100 mm Hg

1.- Premiers résultats de déclenchement

a) Dispositifs utilisés :

Chambre : Le montage utilisé est celui déjà décrit (I-2-a) et (Pl. 3)

Electronique : Le limiteur est constitué par une diode zéner

1) Chambre à 2 électrodes (1^{er} montage)2) Chambre à 2 électrodes (2^{er} montage)3) Chambre à 3 électrodes

Le premier montage amplificateur est constitué par deux doubles triodes E 188 CC formant trois étages amplificateurs et un "cathode follower" de sortie.

entrée négative ($R_e = 1 \text{ k}\Omega$) - sortie positive ($R_s = 100 \Omega$)

schéma : (voir Pl. 9-1) et réponse : (voir Pl. 10-1).

Le blocage est fait par une porte associée à un univibrateur de temps mort. La porte, tube 5725 à deux grilles de commande, reçoit le signal de l'amplificateur sur une grille; elle commande l'impulsion de HT et l'univibrateur de temps mort qui applique le signal de blocage sur la deuxième grille. L'univibrateur est constitué par une double triode E 188 CC à cathodes couplées. (voir Pl. 9-3)

Les signaux de haute tension sont fournis par un univibrateur formé d'une double triode E 188 CC à cathodes couplées. L'impulsion fournie est réglable en amplitude entre 20 et 300 V et en durée entre 6 et 60 μs (voir Pl. 9-5)

schéma de l'électronique : (voir Pl. 9) :

amplificateur (1) $\rightarrow$ blocage (3) $\rightarrow$ système de déclenchement (5)

$R_A = 20 \text{ M}\Omega$ - $C_A = 2000 \text{ pF}$ $R_k = 5 \text{ k}\Omega$ $C_k = 30 \text{ nF}$

alimentation THT + : THT 4

source utilisée : 10 $\mu\text{Ci}^{137}\text{Cs}$

b) Résultats; influence de l'amplitude et de la durée de l'impulsion de commande : (voir Pl. 11)

Ce dispositif donne un déclenchement d'étincelles mais avec un faible rendement. Pour que le fonctionnement soit correct, il faut un blocage efficace de l'électronique avec un temps mort minimal de l'ordre de 10 ms (valeur analogue à celle des chambres commandées utilisées pour les particules de haute énergie). Le temps mort de la chambre est pris supérieur à 0,1 s. Le nombre d'étincelles augmente avec la tension continue d'alimentation et avec l'amplitude de l'impulsion de commande. Il augmente aussi avec la durée de cette impulsion même si celle-ci est supérieure à la durée de l'impulsion de compteur, temps de migration des ions compris. Mais quand la durée de l'impulsion de commande tend vers 0, le taux d'étincelles tend vers une valeur de l'ordre de 0,5 cps.

c) Essai de déclenchement avec un signal de haute tension court ayant un retard variable

Electronique :

La même électronique est utilisée pour l'amplification et le blocage; à la suite sont placés le système de retard variable puis le générateur d'impulsions de haute tension. Le système de retard est un univibrateur formé d'une double triode E 188 CC à cathodes couplées; le retard est égal à la largeur du créneau réglable entre 1 et 30 μs (voir Pl. 9-4).

Le système de déclenchement est constitué d'un tube amplificateur EL 81 suivi d'un thyatron 2 D 21 réglé pour donner une impulsion durant 1 μs (voir Pl. 9-6).

schéma de l'électronique : (voir Pl. 9) :

amplificateur (1) $\rightarrow$ blocage (3) $\rightarrow$ retard (4) $\rightarrow$ système de déclenchement (6)

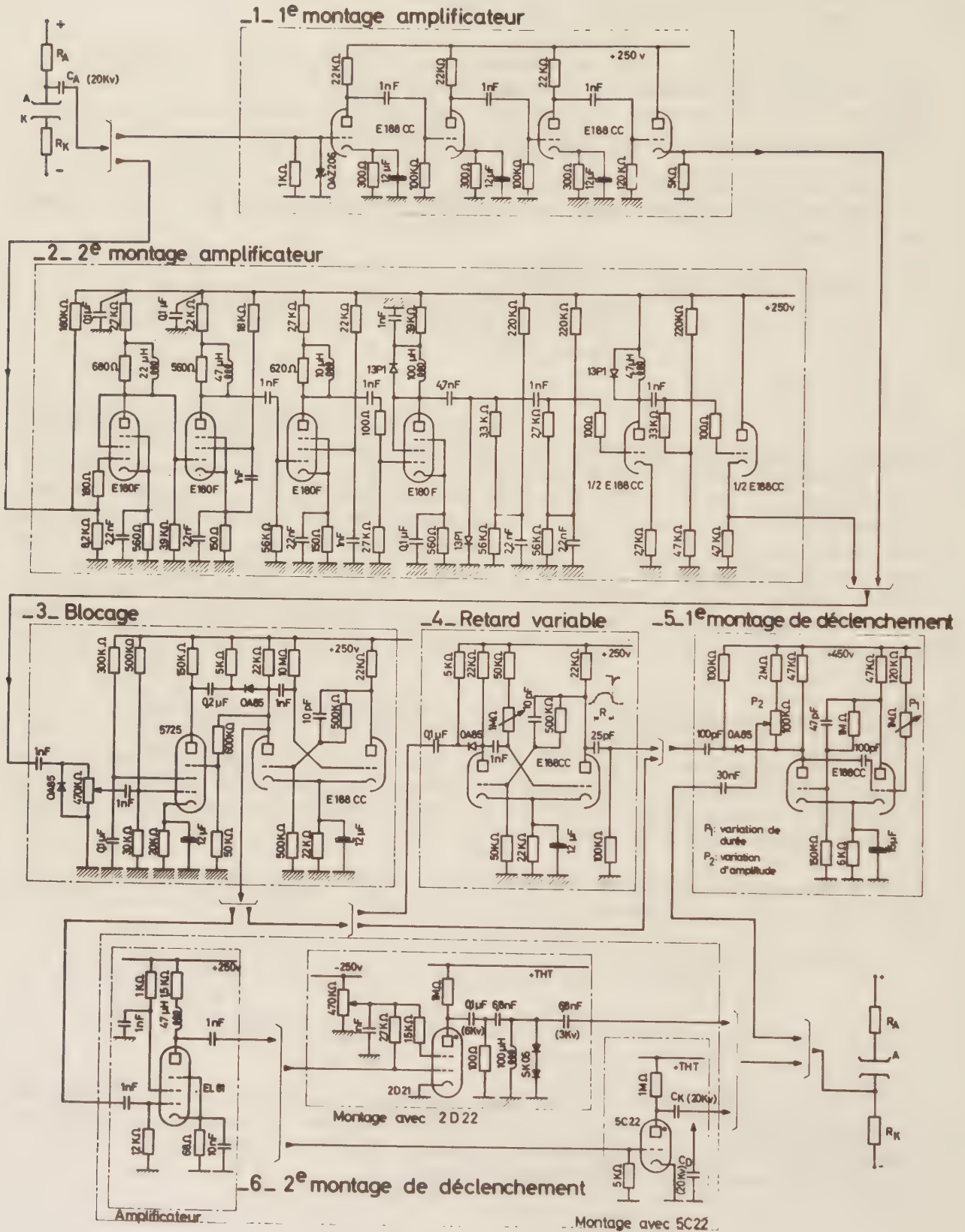
avec 2 D 21

$R_A = 20 \text{ M}\Omega$ $C_A = 2 \text{ nF}$ $R_k = 1,5 \text{ k}\Omega$ $C_k = 7 \text{ nF}$

Résultats :

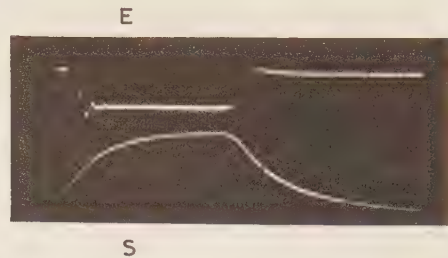
Si le retard dépasse 2 à 3 μs , quels que soient les autres paramètres, il n'y a plus de déclenchement d'étincelles. Il n'y en a pas lorsque le retard correspond au temps de migration des ions c'est-à-dire lorsque l'impulsion est appliquée au moment où devraient se produire les avalanches secondaires provoquées par l'action des ions sur la cathode.

PL :9 ELECTRONIQUE DE DECLENCHEMENT A TUBES

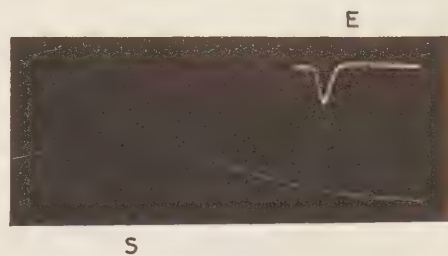


1. MONTAGE AMPLIFICATEUR (PL 9_1)- réponse à un signal carré

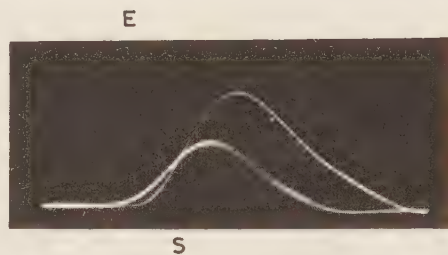
- temps : 10^{-7} s / carreau
- amplitude $\left\{ \begin{array}{l} \text{entrée : } -10 \text{ mV / carreau} \\ \text{sortie : } +50 \text{ V / carreau} \end{array} \right.$
- gain : 10^4 environ
- l'amplificateur sature à 120V

- réponse à une impulsion rapide :

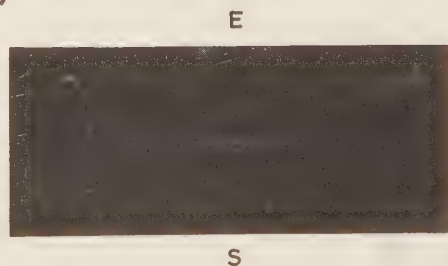
- temps : 10^{-7} s / carreau
- amplitude $\left\{ \begin{array}{l} \text{entrée : } -50 \text{ mV / carreau} \\ \text{sortie : } +20 \text{ V / carreau} \end{array} \right.$
- gain : 10^3 environ

2. MONTAGE AMPLIFICATEUR (PL 9_2)- réponse à une impulsion rapide :

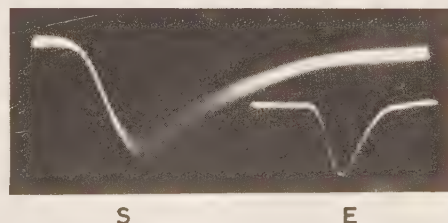
- temps : 20 ns / carreau
- amplitude $\left\{ \begin{array}{l} \text{entrée : } -5 \text{ mV / carreau} \\ \text{sortie : } +10 \text{ V / carreau} \end{array} \right.$
- gain : 6000 environ
- signal de saturation : +30 V environ

3. AMPLIFICATEUR A TRANSISTORS (PL 19_1)-(ensemble limiteur et amplificateur)- réponse à un signal carré

- temps : 10^{-7} s / carreau
- amplitude $\left\{ \begin{array}{l} \text{entrée : } -5 \text{ mV / carreau} \\ \text{sortie : } -2 \text{ V / carreau} \end{array} \right.$
- gain : 800 environ

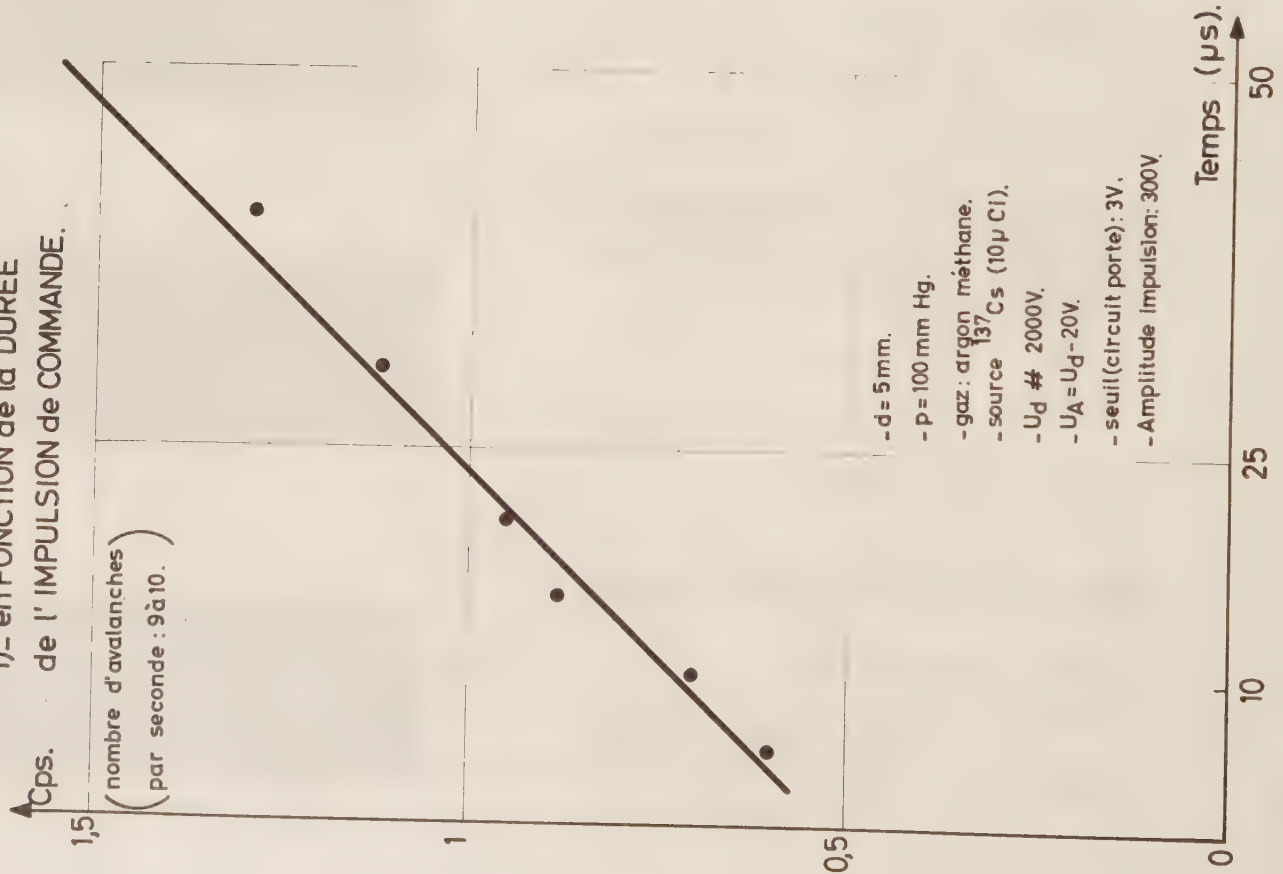
- réponse à une impulsion rapide

- temps : 40 ns / carreau
- amplitude $\left\{ \begin{array}{l} \text{entrée : } -5 \text{ mV / carreau} \\ \text{sortie : } -0,5 \text{ V / carreau} \end{array} \right.$
- gain : 150 environ

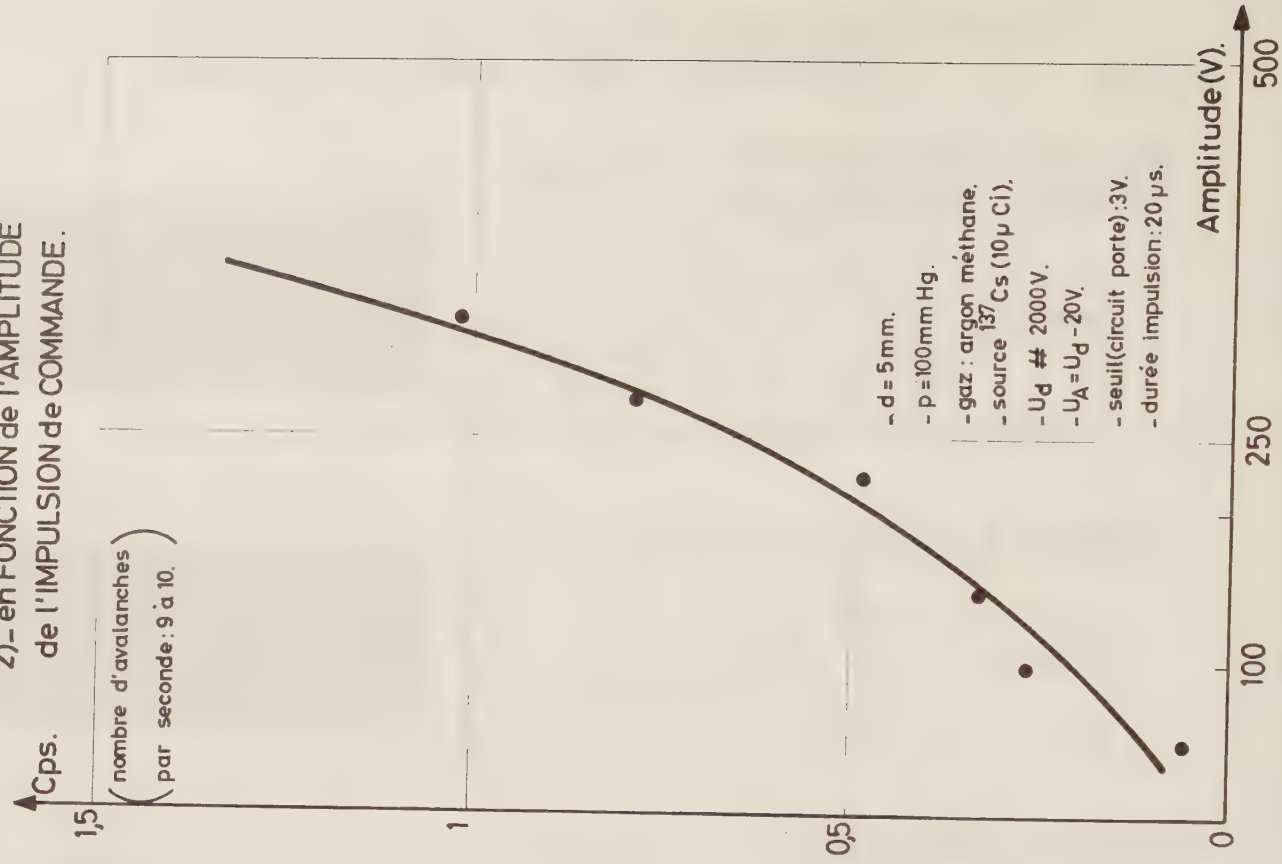


1° ESSAIS de DECLENCHEMENT : VARIATIONS du NOMBRE d'ETINCELLES

1) - en FONCTION de la DUREE de l'IMPULSION de COMMANDE.



2) - en FONCTION de l'AMPLITUDE de l'IMPULSION de COMMANDE.



d) Conclusion

Le déclenchement des étincelles semble se faire, comme prévu, sur les avalanches secondaires dues à l'action des photons sur la cathode, c'est-à-dire avec un retard maximal de quelques microsecondes. Dans le cas d'une impulsion de commande de durée assez importante, il doit se superposer à ce déclenchement une transformation directe en étincelles des avalanches, utiles ou parasites, arrivant en coïncidence avec cette impulsion; la tension totale sur la chambre étant alors supérieure à la valeur U_d .

Le rendement de déclenchement des étincelles augmente avec la tension continue appliquée et avec l'amplitude de l'impulsion de haute tension. L'influence de ces paramètres sur le rendement et la localisation des étincelles est étudiée ci-dessous.

2.- Premiers résultats de localisation à la pression de 100 mm Hg

a) Dispositif utilisé

Chambre (voir Pl. 12) : La chambre se compose d'un corps cylindrique en laiton avec un robinet et deux passages de courant. Elle est fermée par des vitres aux deux extrémités; l'étanchéité est assurée par des joints toriques. L'anode est une grille de bronze phosphoreux (fil ϕ 0,035 mm, vide de maille 0,04 mm) tendue sur un support. La cathode en duralumin est mince 0,3 à 0,5 mm et arrondie sur les bords. Le diamètre utile des électrodes est de 70 mm. La source utilisée, $10 \mu\text{Ci } ^{90}\text{Sr } ^{90}\text{Y}$, est placée dans la chambre sous la cathode. Elle possède un blindage en plomb de 4 mm d'épaisseur avec un trou de 3,5 mm de ϕ .

La distance entre électrodes est de : 5 mm.

Electronique : L'électronique est la même que pour les essais précédents (voir Pl. 9)

- amplificateur (1) $\rightarrow$ blocage (3) $\rightarrow$ système de déclenchement (6)
avec 2 D 21 puis avec 5 C 22
- $R_A = 20 \text{ M}\Omega$ - $C_A = 2 \text{ nF}$ - $R_k = 10 \text{ k}\Omega$ $C_k = 1 \text{ nF}$ (avec le 2 D 21)

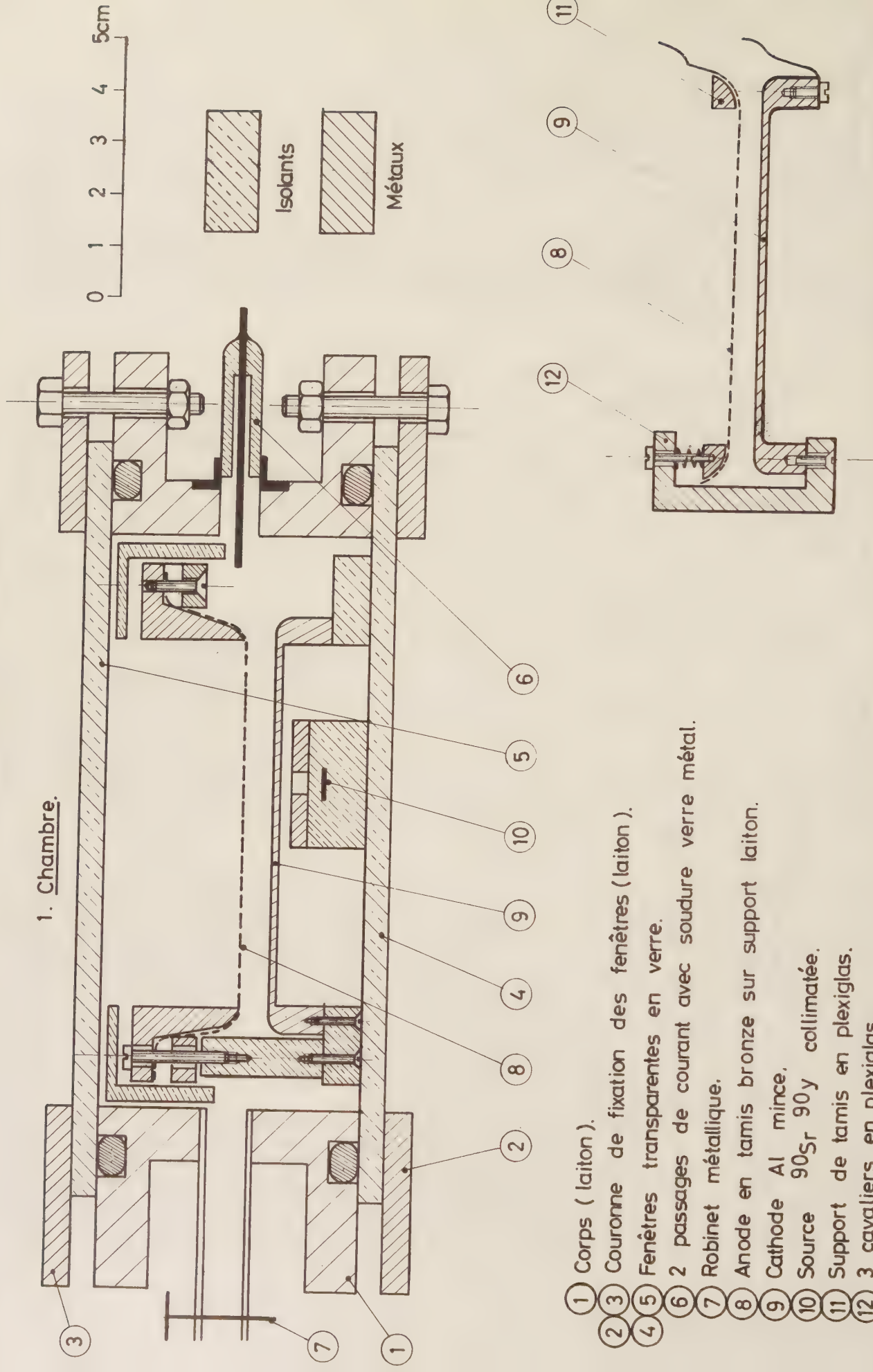
Remarque : Pour que le thyatron 5 C 22 fonctionne correctement, une haute tension importante (3000 à 5000 V) est appliquée sur l'anode. Le réglage de l'amplitude de l'impulsion de tension appliquée sur la chambre est fait par un diviseur capacitif $C_k - C_D$ (voir Pl. 9-6).

HT = 3000 V $C_k = 500 \text{ pF}$ $C_D = 1 \text{ nF}$

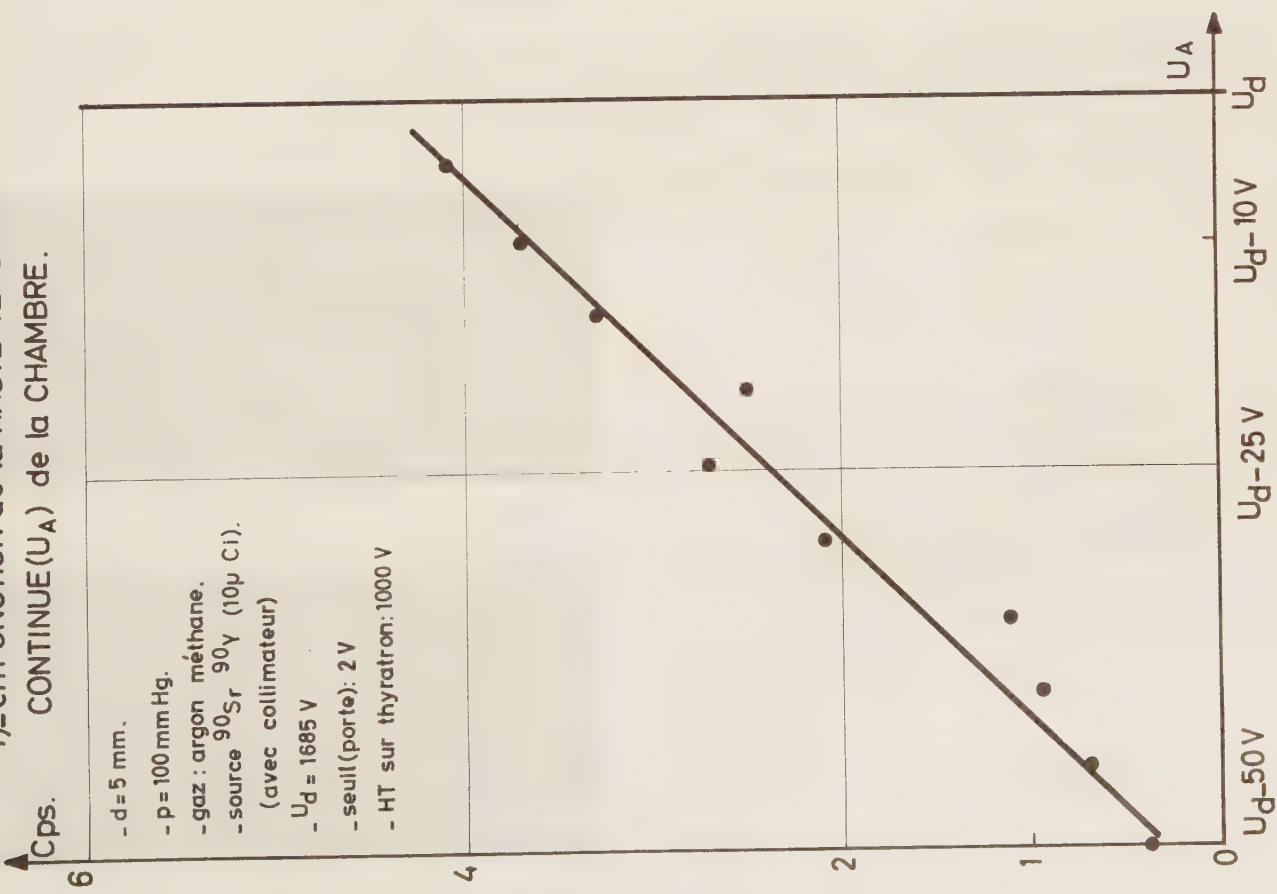
b) Résultats :

Il y a déclenchement d'étincelles avec un rendement appréciable et avec un effet de localisation sensible bien qu'insuffisant. En choisissant la constante de temps du circuit RC d'anode, on arrive à environ 30 étincelles par seconde pour 50 impulsions de commande. Au-dessus de ce taux d'étincelles, il se produit des suites de décharges parasites. Le circuit RC employé pour l'étude de l'influence des paramètres limite le taux d'étincelles à 4 ou 5 par seconde car, au-dessus, le fonctionnement en compteur est déjà perturbé par les étincelles.

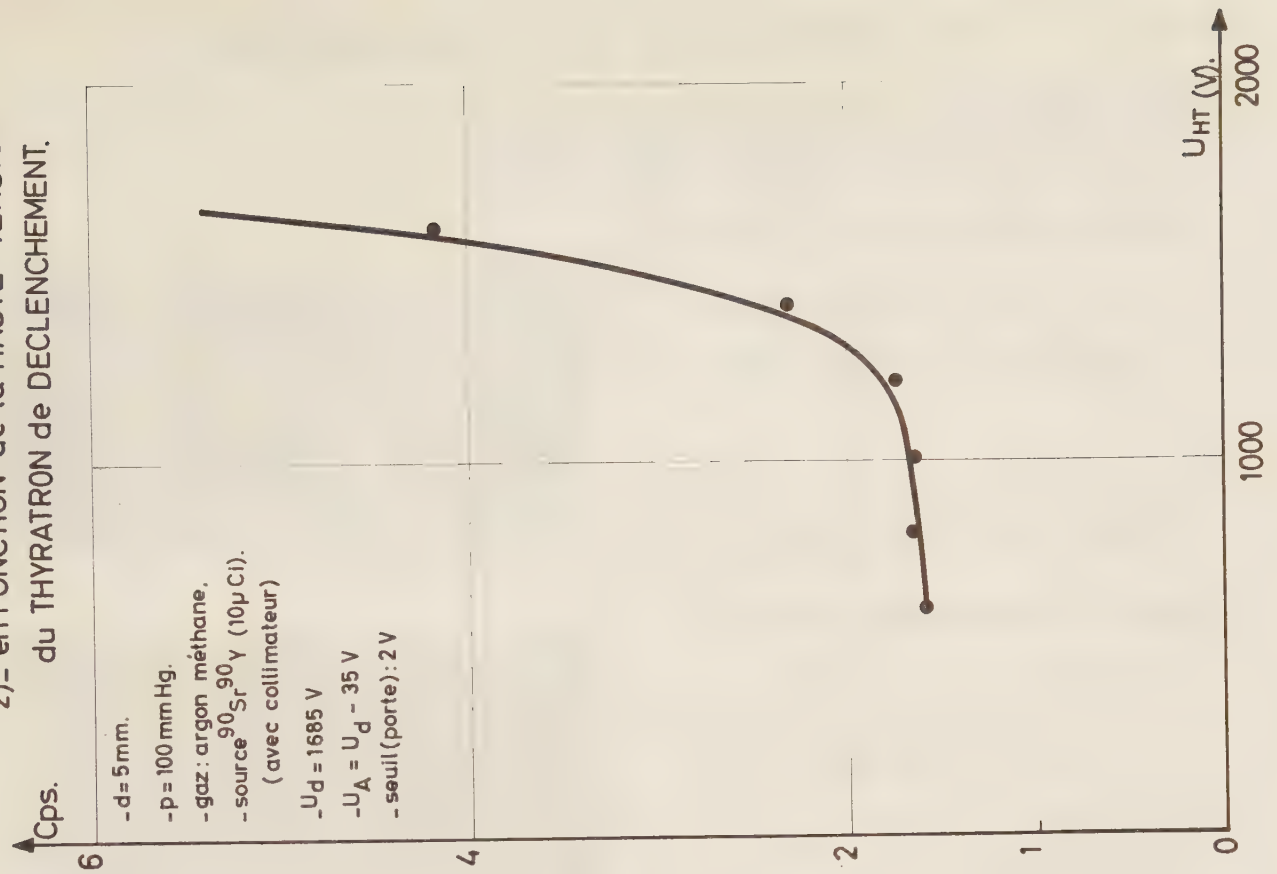
- Le nombre d'étincelles croît rapidement avec l'amplitude de l'impulsion de commande, lorsque celle-ci dépasse 1000 V; mais à partir d'une certaine valeur (de l'ordre de 1500 à 2000 V), des suites d'étincelles parasites prennent naissance. Le nombre d'étincelles croît aussi avec la tension continue U_A appliquée à la chambre. (voir Pl. 13).
- La localisation ne semble pas influencée par l'amplitude de l'impulsion de commande tant que celle-ci ne donne pas d'étincelles parasites. Par contre, lorsque la tension U_A devient supérieure à $U_d - 30 \text{ V}$ environ, il n'y a plus de localisation. L'emploi du thyatron 5 C 22 à la place du 2 D 21 améliore un peu la localisation (le retard au déclenchement est un peu plus court, il devient inférieur à $0,5 \mu\text{s}$ et l'impulsion de haute tension a une montée un peu plus rapide). Les étincelles obtenues avec le meilleur réglage forment des taches de 2 à 3 cm de diamètre. Cette dispersion est due à l'absorption

2^{ème} _ MODELE de CHAMBRE.

1) - en FONCTION de la HAUTE TENSION CONTINUE (U_A) de la CHAMBRE.



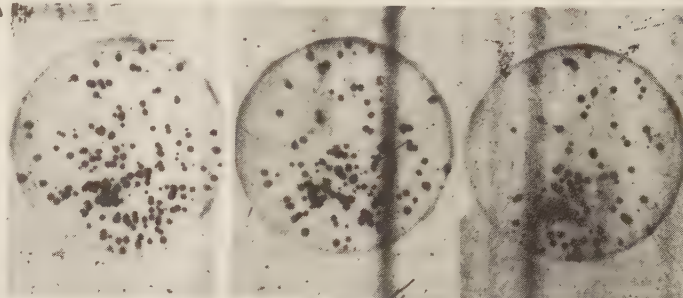
2) - en FONCTION de la HAUTE TENSION du THYRATRON de DECLENCHEMENT.



1. LOCALISATION A LA PRESSION DE 100 mm Hg

- gaz : argon méthane - distance interélectrodes $d = 5$ mm
- source : ^{90}Sr ^{90}Y (10 μCi) - collimateur (Pb) trou : ϕ 3,5 mm
- influence de la tension appliquée U_A

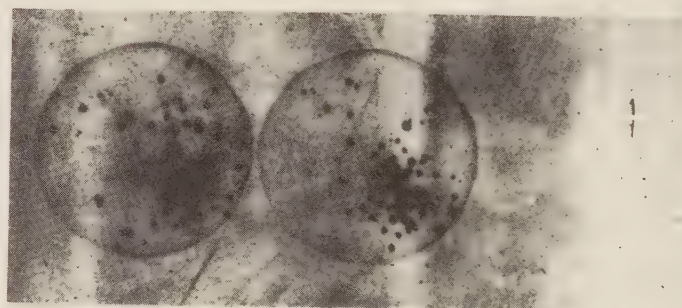
- 1: $U_A = U_d - 5$ V (pose : 30 s)
- 2: $U_A = U_d - 15$ V (pose : 30 s)
- 3: $U_A = U_d - 35$ V (pose : 50 s)
- $U_d = 1685$ V
- $U_p = 1000$ V (impulsion du 2D21)
- polaroid 46 - F/16 - (négatif)



1 2 3

- meilleure localisation obtenue :

- $U_d = 1670$ V
- $U_A = U_d - 40$ V
- $U_p = 1000$ V (impulsion du 5C22)
- polaroid 46 - F/16 - (négatif)
- pose : 50 s
- 5,5 étincelles / seconde

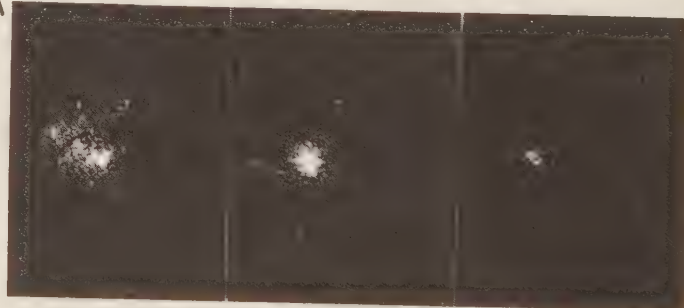


0 10 mm 70 mm

2. LOCALISATION A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

- gaz : argon méthane - distance interélectrodes $d = 5$ mm
- source : ^{90}Sr ^{90}Y (10 μCi) - collimateur (Pb) trou : ϕ 3,5 mm
- influence de la tension appliquée U_A

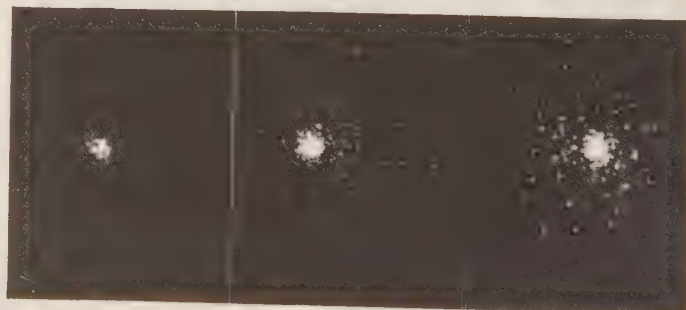
- 1: $U_A = 5650$ V (49 cps)
- 2: $U_A = 5550$ V (35 cps)
- 3: $U_A = 5450$ V (22 cps)
- $U_d = 5675$ V
- $U_p = 1500$ V (impulsion du 5C22)
- polaroid 42 - F/16 - pose : 50 s



1 2 3

- influence de la capacité C_A

- 1: $C_A = 100$ pF (29 cps)
- 2: $C_A = 300$ pF (25 cps)
- 3: $C_A = 500$ pF (9 cps)
- $U_d = 5675$ V
- $U_A = 5500$ V
- $U_p = 1500$ V (impulsion du 5C22)
- polaroid 42 - F/16 - pose : 50 s



0 10 mm 70 mm

insuffisante des photons qui donnent des avalanches secondaires; la localisation sera en effet améliorée par une augmentation de la pression du gaz. Les premiers résultats de localisation obtenus à la pression de 100 mm Hg sont donnés (Pl. 14-1).

2 - RESULTATS OBTENUS A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE AVEC UNE SOURCE β :

1.- Premiers résultats de déclenchement et de localisation obtenus à la pression atmosphérique :

a) Dispositif utilisé :

Chambre :

La même chambre (Pl. 12-1) est utilisée. Cependant, pour éviter les claquages parasites qui se produisent avec la tension plus élevée utilisée, la grille constituant l'anode est tendue et collée sur une couronne de plexiglas qui est reliée mécaniquement à la cathode par des cavaliers de plexiglas en forme de U. (Pl. 12-2).

Electronique :

L'électronique est la même également. Toutefois, la cathode est reliée à une alimentation négative car les alimentations les plus élevées alors disponibles (type 5015-Mesco) donnent 5000V au maximum alors que la tension disruptive, à la pression atmosphérique avec une distance entre électrodes de 5 mm est de l'ordre de 6000 V. La capacité de liaison C_A doit être ajustée pour permettre un fonctionnement correct. En dessous de 100 pF, il se forme des suites d'étincelles parasites. Au-dessus de 300 pF, les étincelles perturbent le fonctionnement de la chambre car elles deviennent fortes; de plus, leur nombre diminue. Avec des grandeurs de cet ordre, le fonctionnement en chambre à étincelles est correct, il n'y a pas trop de perturbation sur le fonctionnement en compteur avec des taux de 20 à 30 étincelles par seconde.

schéma électronique : (voir Pl. 9) :

amplificateur (1) → blocage (3) → déclenchement (6) avec 5 C 22
 $R_A = 20 \text{ M}\Omega$ $C_A = 100 \text{ à } 300 \text{ pF}$ $R_k = 50 \text{ k}\Omega$ $C_k = 50 \text{ pF}$
 $C_D = 150 \text{ pF}$

bloc diagramme : (Pl. 8-2) THT + : (Mesco type 5015 : + 5000 V)
 THT - : (THT 5 : -2500 V)
 THT du 5 C 22 : (Mesco : + 5000 V)

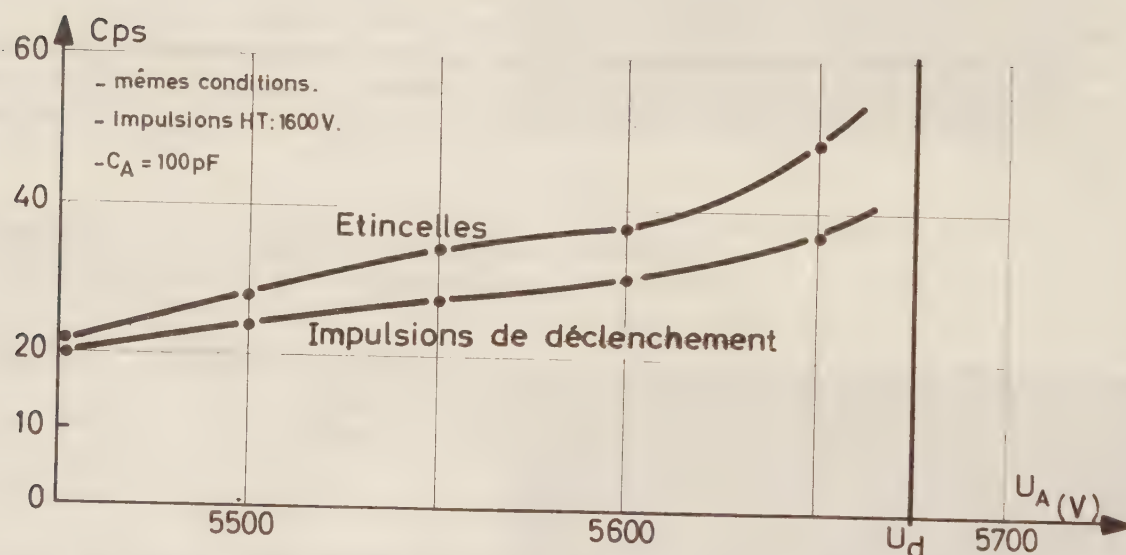
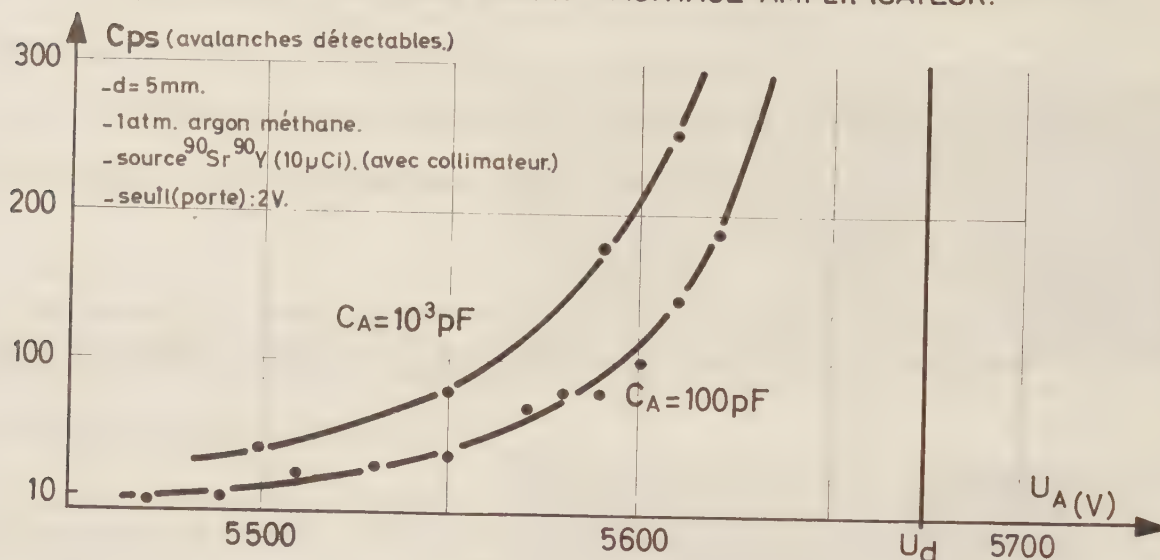
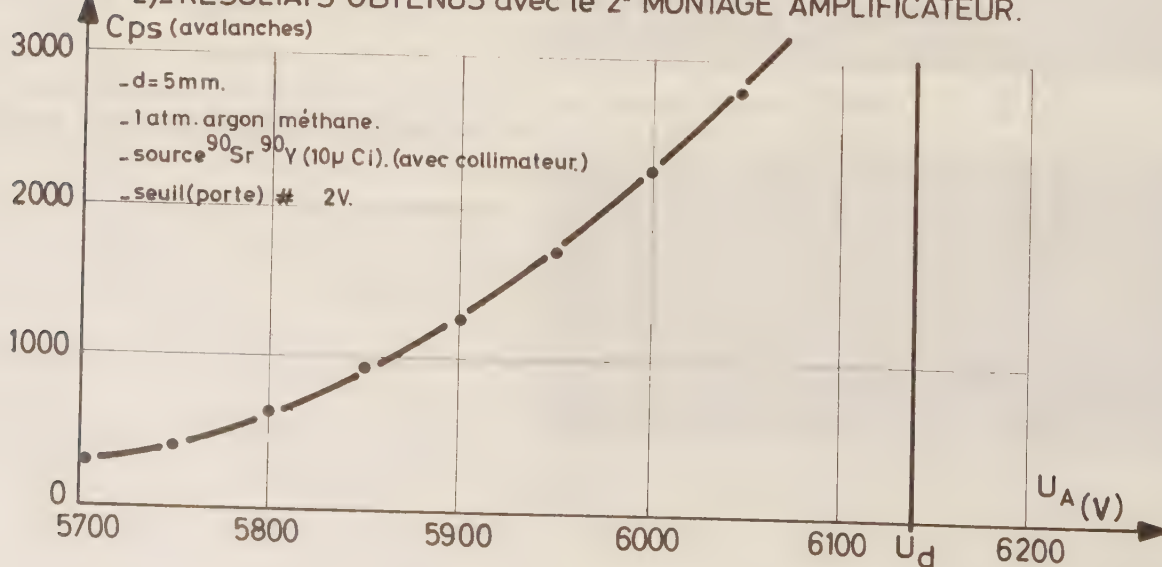
b) Résultats

Les impulsions de compteur dépassant le seuil de déclenchement à la sortie de l'amplificateur sont plus nombreuses qu'à la pression de 100 mm Hg et s'étendent sur une plage de tension plus importante, de l'ordre de 150 V pour une valeur de 5700 V (voir Pl. 15-1).

Lorsqu'il y a déclenchement d'étincelles, le nombre d'impulsions utilisables diminue à cause du temps mort. Avec des taux de 20 à 30 étincelles par seconde et une capacité C_A inférieure à 300 pF le rendement de déclenchement des étincelles par rapport aux impulsions de commande est de 1. Il y a en plus quelques étincelles parasites :

$C_A = 100 \text{ pF}$	24 impulsions de commande	28 étincelles
$C_A = 300 \text{ pF}$	22 impulsions de commande	25 étincelles
$C_A = 500 \text{ pF}$	22 impulsions de commande	6 étincelles

Le nombre d'étincelles croît assez lentement en fonction de la tension U_A appliquée sur la chambre (voir Pl. 15-1).

1)_RESULTATS OBTENUS avec le 1^{er} MONTAGE AMPLIFICATEUR.2)_RESULTATS OBTENUS avec le 2^e MONTAGE AMPLIFICATEUR.

La localisation est nettement meilleure que celle obtenue à $p = 100 \text{ mm Hg}$; elle varie aussi avec la tension U_A . Il n'y a pas de localisation si celle-ci est voisine de U_d . Pour $U_A \ll U_d - 50 \text{ V}$, les étincelles donnent une tache dense correspondant à la partie arrosée par la source avec des étincelles très clairsemées autour; quand U_A décroît, la localisation ne semble pas varier mais le nombre d'étincelles décroît rapidement et devient insuffisant pour donner une image correcte. (voir Pl. 14-2)

La plage de fonctionnement est environ : $U_d - 200 \text{ V} < U_A \ll U_d - 50 \text{ V}$

c) Conclusion

Le dispositif étudié peut donc fonctionner correctement avec un mélange argon méthane à la pression atmosphérique et avec une distance entre électrodes de 5 mm. La chambre, pour être utilisable pratiquement, doit pouvoir localiser des sources placées à l'extérieur, la cathode mince doit donc être placée contre la paroi de la chambre ou servir de paroi. Les performances peuvent être améliorées par une électronique ayant un gain supérieur pour amplifier toutes les impulsions détectées au-dessus du seuil utilisable et ayant une réponse plus rapide pour déclencher plus tôt sur les avalanches secondaires. C'est ce qui est recherché avec le montage suivant.

2.- Résultats obtenus à la pression atmosphérique avec la chambre à 2 électrodes et une source β :

Ces résultats ont été publiés en 1963 [26].

a) Dispositif utilisé

Chambre (Voir Pl. 16)

Le corps est un manchon cylindrique en verre; trois passages de courant et un robinet y sont fixés par des joints d'araldite. La partie supérieure est fermée par une vitre et la partie inférieure par une couronne de laiton. Cette couronne est solidaire de la cathode qui forme la paroi au centre de la base, par un coulage d'araldite isolant et étanche. Des joints de néoprène assurent l'étanchéité entre le corps et les parois supérieure et inférieure. La cathode en duralumin a 0,5 mm d'épaisseur. Le tamis formant l'anode est en bronze (fil 0,035 mm, vide de maille 0,04 mm), il est tendu par collage sur une couronne de plexiglas.

Electronique

L'amplificateur utilisé pour ces essais est donné (Pl. 9-2). Il est composé de 4 étages amplificateurs (E 180 F) qui sont suivis d'un étage déphaseur et d'un "cathode follower" (E 188 CC).

entrée négative $R_e = 8 \text{ k}\Omega$ sortie positive $R_s = 100 \Omega$.
gain 6500 - voir réponse de l'amplificateur (Pl. 10-2).

- Bloc diagramme de l'électronique : (voir Pl. 8-2).

Le limiteur à l'entrée de l'amplificateur, est constitué par un thyatron à cathode froide Z 70 U en série avec une résistance de 100Ω .

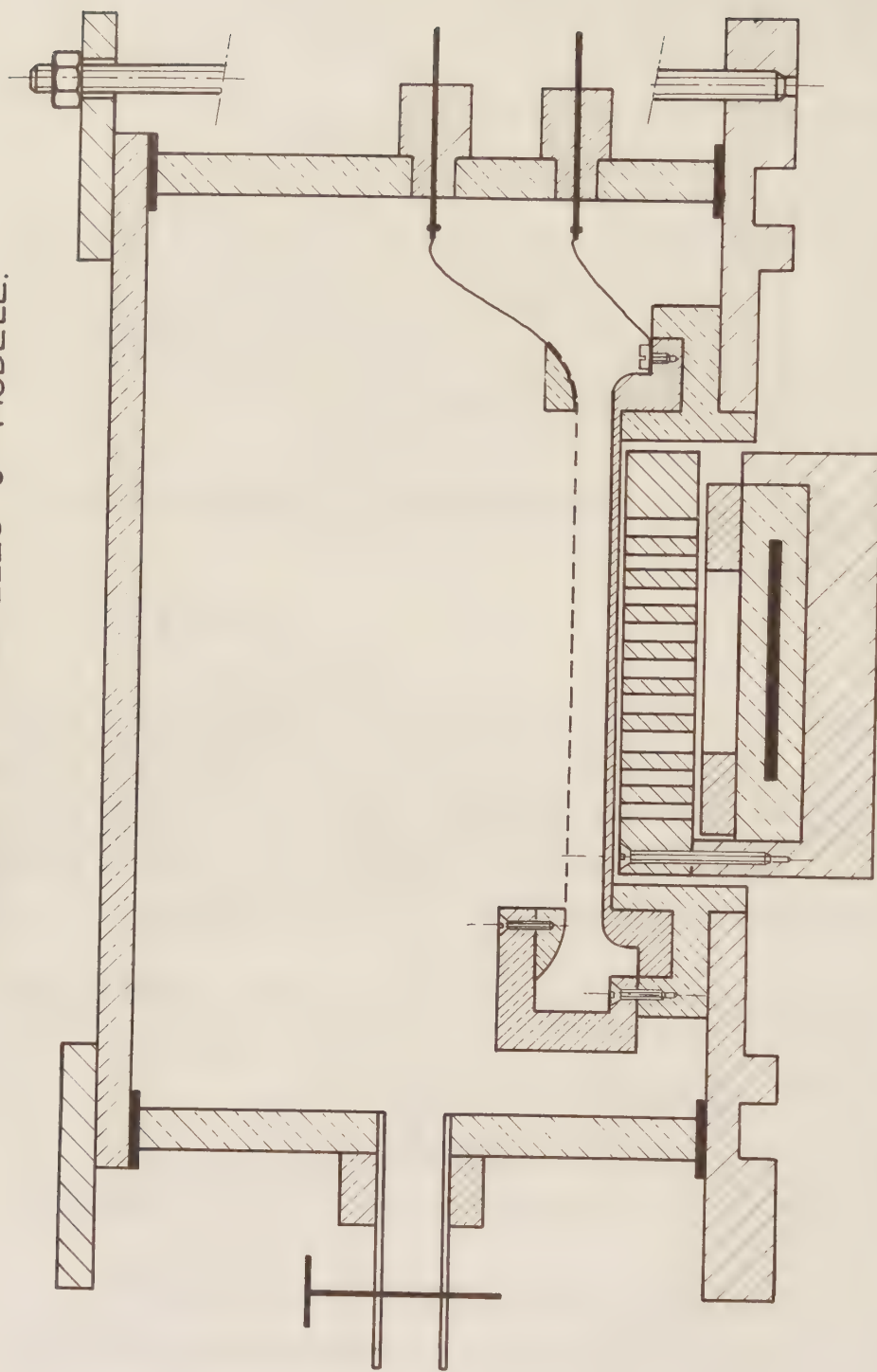
- Détails de l'électronique : (voir Pl. 9).

amplificateur (2) → blocage (3) → déclenchement (6) avec 5 C 22

Avec ce montage, il est nécessaire d'augmenter la résistance d'anode de la chambre pour éviter les accrochages et les décharges parasites.

$R_A = 100 \text{ M}\Omega$ $C_A = 100 \text{ pF}$ $R_k = 50 \text{ k}\Omega$
L'impulsion donnée par le 5 C 22 est de 2500 à 3000 V.

Le signal minimal détectable sur la chambre est de $300 \mu\text{V}$ ce qui correspond environ à $8 \cdot 10^4$ électrons (la capacité parasite à l'entrée de l'électronique étant de 42 pF).



ISOLANTS

verre.
araldite.
plexiglas.



METALX

laiton.
duralumin
plomb.



0 1 2 3 4 5cm.

b) Résultats en compteur (régime d'avalanches)

Le comptage obtenu avec cette électronique plus sensible est nettement plus important et s'étend sur une plage de tension plus grande (voir Pl. 15-2). La comparaison entre les comptages donnés par la chambre et ceux donnés par un détecteur à scintillation montre que tous les β donnent une impulsion utilisable pour une tension U_A de l'ordre de $U_d - 100$ V

Le dispositif de comptage à scintillation et le spectre β de la source de ^{90}Sr ^{90}Y ($10\ \mu\text{Ci}$) sont donnés (Pl. 17).

Résultats : avec tension U_A (sur la chambre) de 6046 V ($U_d = 6140$ V)

Diamètre du trou du collimateur (mm)	3,5	2	1,5	1
Comptage obtenu avec le scintillateur	2850 cps	491	253	66
Comptage obtenu avec la chambre	2900	500	250	76

Le seuil de comptage utilisé pour les impulsions d'avalanches données par la chambre est pris égal à l'amplitude minimale des impulsions utilisables : 2 V. Le bruit de fond, dans les conditions de la mesure (circuit de déclenchement débranché) est de 27 cps; 7 cps sont dus à la chambre. Lorsque le circuit de déclenchement est branché, le bruit de fond est beaucoup plus important, 300 à 500 cps, ce qui rend cette électronique impropre à une étude sérieuse de la chambre

c) Résultats en chambre à étincelles déclenchée :

L'étude en compteur a déjà montré que l'électronique possède une sensibilité suffisante, mais qu'elle donne un bruit de fond beaucoup trop important dans les conditions normales d'emploi. Dans le fonctionnement avec les étincelles elle "accroche" facilement. Cela l'oblige à faire des réglages pour obtenir un fonctionnement satisfaisant, car les conditions dans lesquelles se font les accrochages sont variables.

Ce dispositif ne permet donc pas de faire une étude des caractéristiques de fonctionnement. Il donne cependant des résultats pratiques très intéressants avec les rayonnements β . (voir Pl. 18-1).

Localisation de source ponctuelle :

L'image donne une surface très nettement contrastée correspondant pratiquement à la surface du trou du blindage avec peu d'étincelles parasites autour.

Localisation d'une source avec une "grille collimatrice" :

la grille est un blindage de plomb de 1 cm d'épaisseur avec des trous de ϕ 2 mm espacés de 4 mm. L'image donne des taches séparées des différents trous et traduit fidèlement la forme de la source.

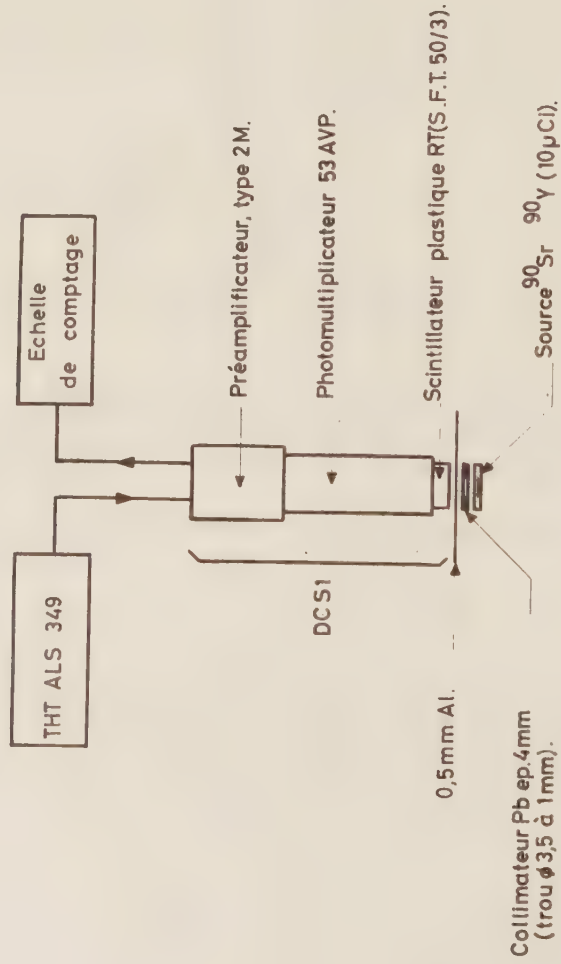
Un essai avec une source de ^{141}Ce a donné un rendement très faible et une mauvaise localisation de la source.

d) Conclusion

Ce dispositif peut donner les résultats de localisation escomptés, mais pour étudier l'influence des différents paramètres sur le fonctionnement et pour analyser les phénomènes physiques qui se produisent, une électronique plus élaborée s'impose. Un essai d'électronique à transistors, fait dans ce but, est décrit ci-dessous (III-2-3).

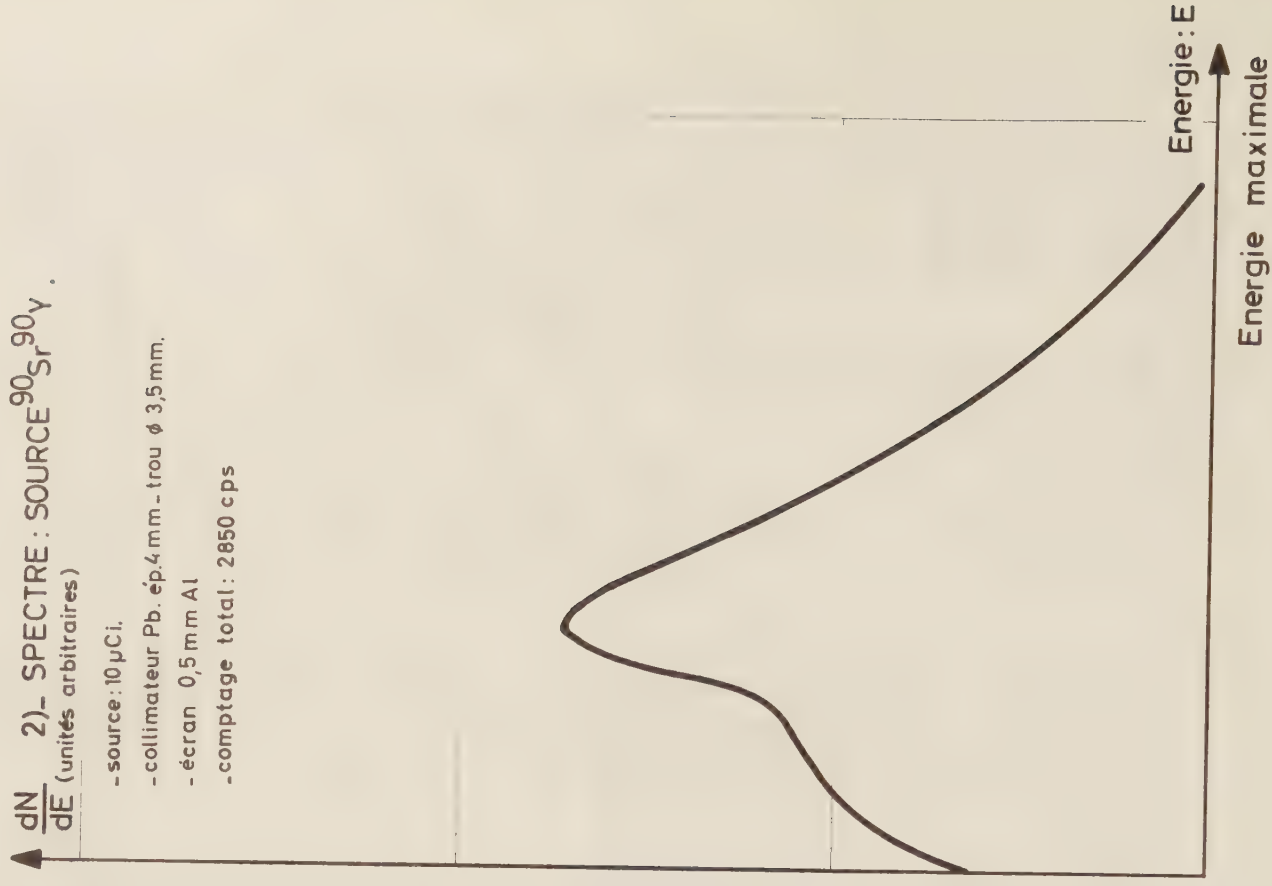
SPECTRE de la SOURCE de β UTILISEE POUR l'ETUDE de la CHAMBRE.

1)- DISPOSITIF DE COMPTAGE.



2)- SPECTRE : SOURCE ^{90}Sr ^{90}Y .

- source : $10\mu\text{Ci}$.
- collimateur Pb. ép. 4 mm - trou ϕ 3,5 mm.
- écran 0,5 mm Al
- comptage total : 2850 cps



LOCALISATION D'UN EMETTEUR β AVEC LA CHAMBRE A 2 ELECTRODES

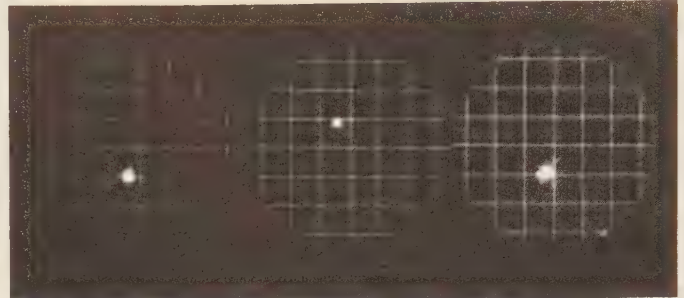
1. RESULTATS OBTENUS AVEC L'ELECTRONIQUE A TUBES

- gaz : 1 atm. argon méthane
- distance interélectrodes : $d = 5 \text{ mm}$

a) localisation d'une source ponctuelle

- Source : 90 Sr 90 Y (50 μCi)
- 1: ϕ collimateur = 3,5 mm ($U_p = 2500 \text{ V}$)
- 2: ϕ " = 2 mm ($U_p = 2500 \text{ V}$)
- 3: ϕ " = 3,5 mm ($U_p = 3000 \text{ V}$)
- $U_d = 6025 \text{ V}$
- $U_A = U_d - 100 \text{ V}$
- U_p = impulsion de 5C22
- polaroïd 42 - F/16 - pose : 1 minute

carreaux de 1cm de côté



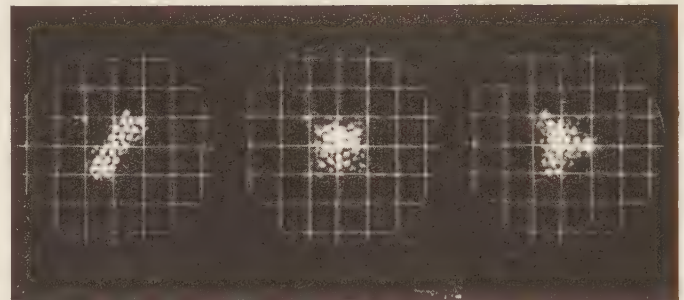
1

2

3

b) localisation d'une source étendue

- Source: 90 Sr 90 Y (10 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)
- grille collimatrice = (Pb)
- trous : ϕ 2 mm - distants de 4 mm
- caches : carré - rectangle - triangle -
- $U_d = 6025 \text{ V}$
- $U_A = U_d - 100 \text{ V}$
- $U_p = 2500 \text{ V}$ (impulsion de 5C22)
- polaroïd 42 - F/16 - pose : 5 minutes



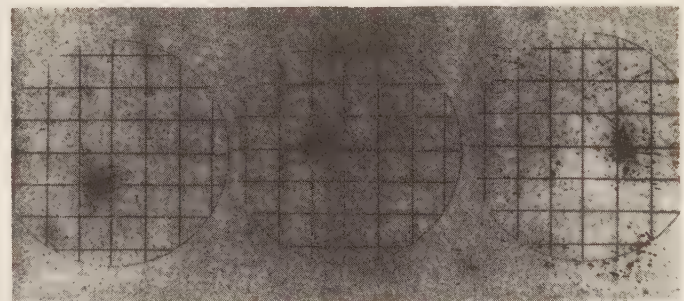
2. RESULTATS OBTENUS AVEC L'ELECTRONIQUE A TRANSISTORS :

- gaz : 1 atm. argon méthane
- distance interélectrodes : $d = 5 \text{ mm}$

a) 1° montage à transistors :

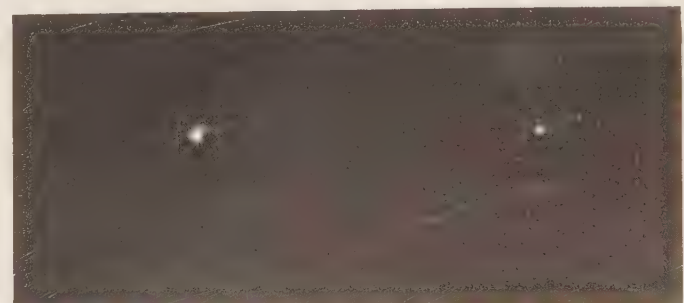
- Source : 90 Sr 90 Y (10 μCi)
- collimateur : trou ϕ 3,5 mm
- $U_d = 6100 \text{ V}$
- $U_A = U_d - 100 \text{ V}$
- $U_p = 2000 \text{ V}$ (impulsion de EFP 60)
- polaroïd 46 - F/16 - (négatif)

carreaux de 1cm de côté

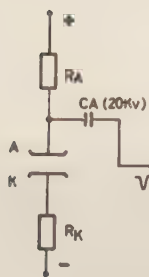


b) 2° montage à transistors :

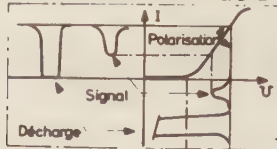
- Source : 90 Sr 90 Y (10 μCi)
- collimateur : trou ϕ 3,5 mm
- $U_d = 6100 \text{ V}$
- $U_A = U_d - 100 \text{ V}$
- $U_p = 2000 \text{ V}$ (impulsion de EFP 60)
- polaroïd 42 - F/16 -
- 1. pose : 2 minutes
- 2. pose : 1 minute



PL:19 ELECTRONIQUE DE DECLENCHEMENT A TRANSISTORS



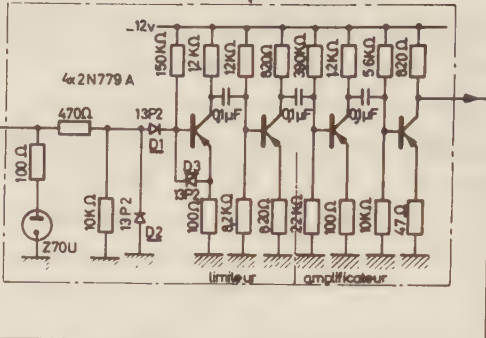
Fonctionnement de D1



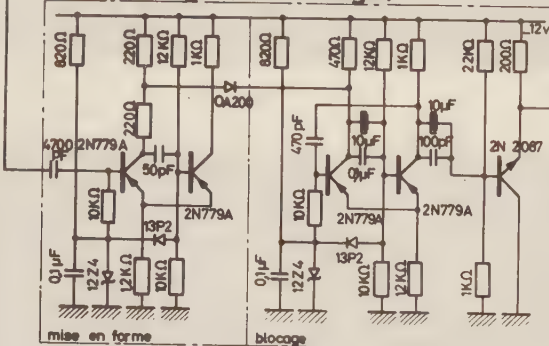
Fonctionnement de D2 et D3



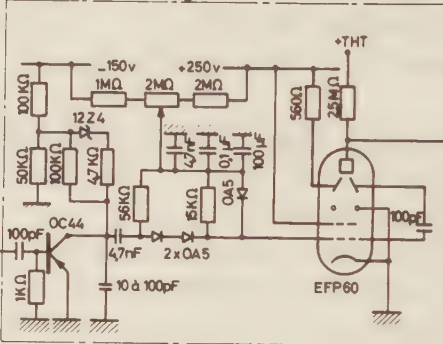
-1- Limiteur + amplificateur



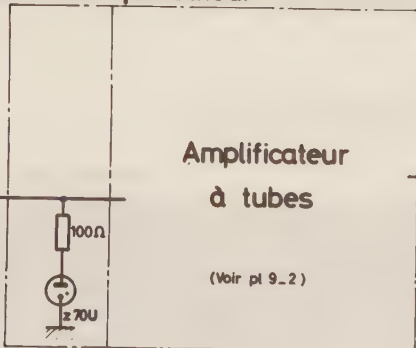
-2- Blocage (1^e montage)



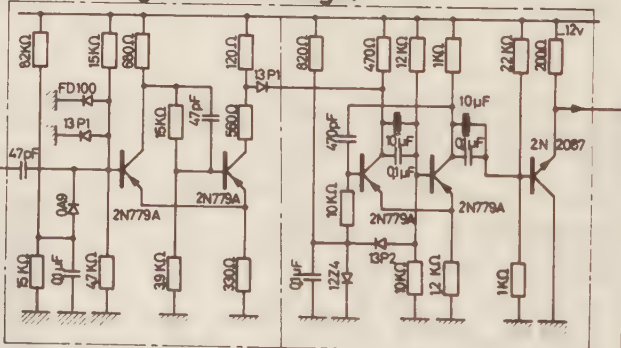
-3- 1^e montage de déclenchement



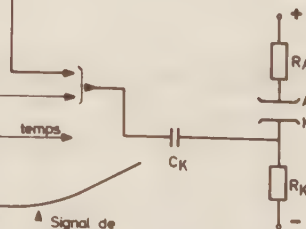
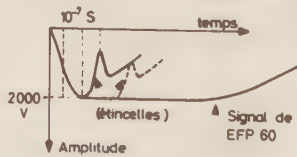
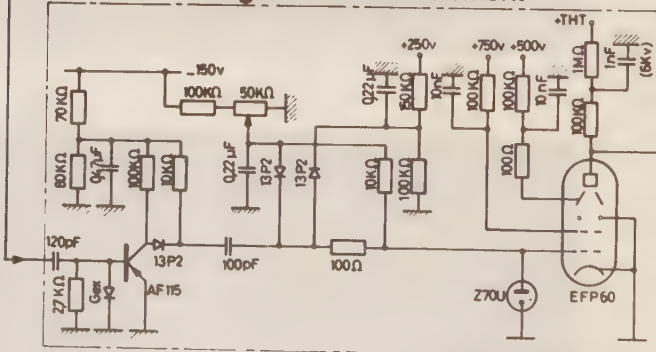
-4- Amplificateur



-5- Blocage (2^e montage)



-6- 2^e montage de déclenchement



La chambre convient pour analyser les émetteurs β qui donnent une trace primaire sur toute la longueur de la distance interélectrodes. Elle n'est pas adaptée pour la détection des rayons X qui donnent un effet photo-électrique en un point quelconque. Il faut donc un dispositif dans lequel les électrons primaires, donnés par l'effet photo-électrique, parcourent, dans tous les cas, toute la distance entre les électrodes. Ce problème peut être résolu avec l'emploi d'une chambre à 3 électrodes. Les premiers résultats obtenus avec un tel montage est décrit ci-dessous (III-3).

3 - Essai avec électronique à transistors :

a) Electronique (voir Pl. 19)

Les transistors donnent de très bons résultats dans l'amplification et la commutation rapides et pourraient résoudre les problèmes que posent l'électronique associée à la chambre. Les essais décrits ci-dessous ont pour but de définir les principales caractéristiques d'une telle électronique.

La protection des transistors contre les signaux d'étincelles est un problème délicat. Nous avons obtenu un dispositif de protection assez simple qui donne des résultats efficaces. Il comporte un thyatron à cathode froide Z 70 U et 3 diodes 13 P2 polarisées près du coude de la caractéristique directe : 2 diodes placées en dérivation sont bloquées normalement et se débloquent pour le signal de l'étincelle, entre les deux, la troisième placée en série conduit les signaux de compteur et se bloque rapidement sous le signal de l'étincelle. Les signaux parasites passent par effet capacitif, ils sont assez faibles et très brefs, ils ne détruisent pas les transistors, (voir Pl. 19-1) et ils sont bloqués à la sortie de l'amplificateur.

L'amplificateur est formé par 2 transistors 2 N 779 A (Pl. 19-1). Le circuit de blocage placé à la suite est composé d'un univibrateur ou d'un "trigger" pour la mise en forme des signaux et d'un univibrateur de blocage de durée 10 ms environ (Pl. 19-2 et 5).

Le front de montée du signal de blocage différentiel, transmis par un "émetteur follower" commande un transistor avalanche qui déclenche l'impulsion de haute tension sur un tube EFP 60.

- montage électronique : (voir Pl. 19).

limiteur et amplificateur (1) $\rightarrow$ blocage (2) $\rightarrow$ déclenchement (3)
 $C_A = 300 \text{ pF}$ $R_A = 100 \text{ M}\Omega$ $C_k = 100 \text{ pF}$ $R_k = 6,8 \text{ k}\Omega$

b) Résultats : (voir Pl. 18-2a)

L'électronique à transistors fonctionne normalement en présence d'étincelles mais les performances données par ce premier montage peu rapide et de faible gain sont limitées, le rendement est faible et il y a une certaine dispersion dans la localisation (taches de 1 cm de diamètre pour un diamètre de source de 3,5 mm).

c) Autre ensemble électronique :

L'amplificateur à transistors de gain insuffisant est remplacé par l'amplificateur à tube (schéma Pl. 9-2).

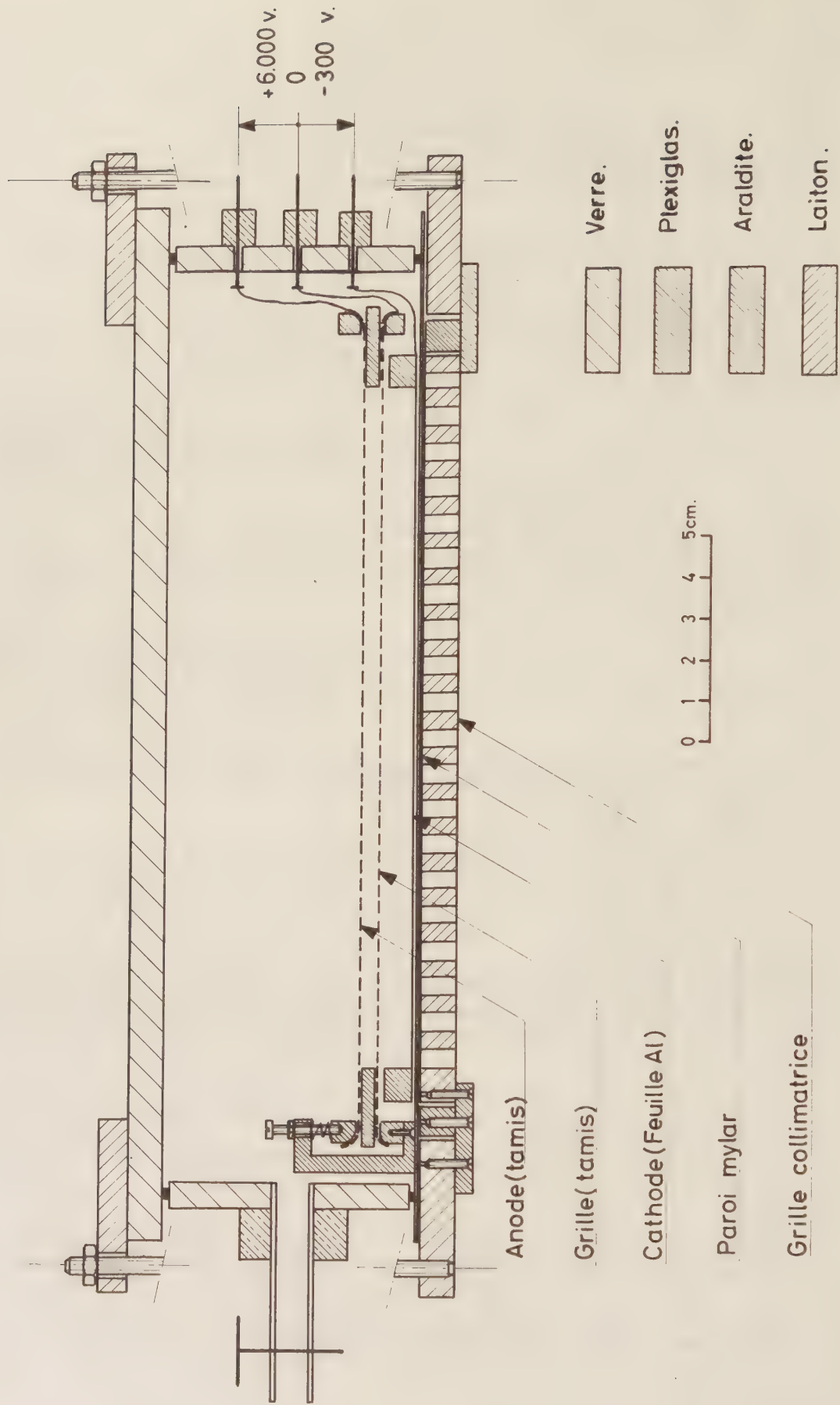
- montage électronique : (voir Pl. 19)

amplificateur (4) $\rightarrow$ blocage (5) $\rightarrow$ déclenchement (6)
 $R_A = 100 \text{ M}\Omega$ $C_A = 100 \text{ pF}$ $R_k = 10 \text{ k}\Omega$ $C_k = 47 \text{ pF}$

Le retard du signal de déclenchement donné par l'électronique est de 250 ns.

PL: 20

CHAMBRE à ETINCELLES à 3 ELECTRODES de 160mm de DIAMETRE UTILE.



d) Résultats : (voir Pl. 18-2-b)

Les résultats sont améliorés : les images correspondent au diamètre du collimateur. La localisation varie avec le temps de montée de l'impulsion de HT donnée par le tube EFP 60 dont le réglage est délicat et qui fournit des impulsions parasites. Le déclenchement de l'étincelle se fait en général 300 ns après le début de l'impulsion.

e) Conclusion :

Il est donc possible de protéger, de manière simple, les transistors contre les surtensions données par les étincelles et de faire une électronique de déclenchement transistorisée. Les premiers montages effectués ont des performances encore faibles mais les renseignements apportés ont permis de construire ultérieurement un ensemble mieux adapté.

3 - ESSAI D'UNE CHAMBRE A 3 ELECTRODES A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE AVEC UNE SOURCE X :

Les résultats obtenus ont été publiés en 1964 [27]

Montage utilisé :

Chambre : voir dessin (Pl. 20); photo (Pl. 21); électrodes (Pl. 25-2). L'enceinte est formée d'un manchon de verre ($\phi = 250$ mm, $h = 80$ mm, ép = 10 mm). La vitre supérieure (ép = 10 mm) et la feuille de mylar (ép = 0,25 mm) constituant la paroi inférieure sont serrées sur le corps par deux couronnes métalliques réunies par des boulons. L'étanchéité est assurée par des joints d'indium. Trois passages de courant et un robinet sont fixés, par de l'araldite, sur le corps latéral.

Les trois électrodes sont planes, parallèles, de diamètre utile 160 mm. Une grille et une anode correspondent respectivement à la cathode et à l'anode du montage précédent et déterminent l'espace étincelles. Elles sont identiques, formées d'un grillage (bronze ou acier inoxydable avec maille de 0,08 mm et ϕ de fil de 0,04 mm) tendu sur une couronne de plexiglas. "L'espace étincelles" (15 mm) est défini par une couronne de plexiglas. Une cathode, feuille d'aluminium (5 mg/cm²) tendue sur une couronne de plexiglas est placée sous la grille contre la paroi inférieure de la chambre. Entre ces deux électrodes, "l'espace détection" fait 10 mm. Le montage des électrodes entre-elles est assuré par des cavaliers en plexiglas.

Electronique :

L'électronique employée est le montage à tubes avec thyatron car le tube EFP 60 utilisé avec le montage à transistors n'a pas une puissance suffisante pour commander une impulsion de HT sur une chambre de grande surface ayant une capacité importante.

- bloc diagramme électronique : (Pl. 8-3)

- détail de l'électronique : (voir Pl. 9)

amplificateur (2) → blocage (3) → déclenchement (6) avec 5 C 22

$R_A = 100 \text{ M}\Omega$ $C_A = 100 \text{ pF}$ $R_k = 50 \text{ k}\Omega$

impulsions de déclenchement 2500 à 3000 V.

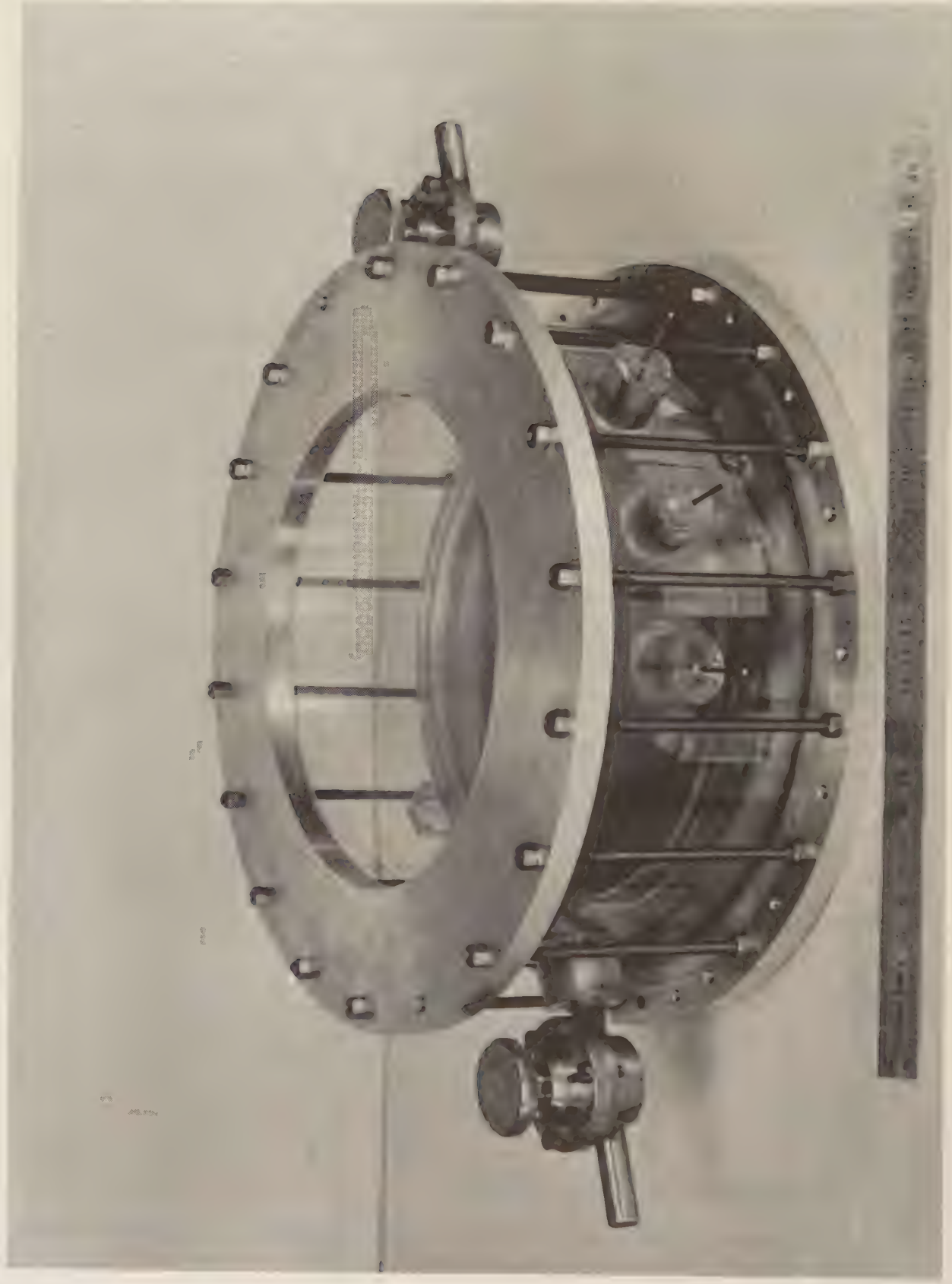
THT + : + 7 kV (FONTAINE)

HT - : 0 à - 400 V (CRC)

1.- Résultats obtenus en chambre déclenchée :

Le comportement du dispositif est sensible à la tension appliquée sur l'espace détecteur qui joue non seulement sur les performances, mais aussi sur le mode de fonctionnement.

PL:21 CHAMBRE , A 3 ELECTRODES DE GRANDE SURFACE



Avec des tensions assez importantes sur cet espace, quelques centaines de Volts, on obtient le fonctionnement cherché c'est-à-dire une augmentation importante du nombre d'impulsions d'avalanches données par une source X.

La source utilisée pour les essais est de l'iode 125, donnant principalement un rayonnement de 27 KeV. spectre (Pl. 40-3). La chambre en régime de compteur en donne un spectre déformé mais le rendement de détection de l'ordre de 1 % correspond au rendement théorique (voir IV-3-1). Les images obtenues en déclenchant les étincelles sont bonnes; on ne sépare plus les trous du collimateur, mais la définition est bonne et on retrouve sur l'image donnée par les étincelles les différences d'homogénéité de la source. (voir Pl. 22).

2.- Nouveau mode de fonctionnement de la chambre à étincelles :

Les essais effectués avec le montage à trois électrodes nous ont permis de découvrir un nouveau mode de fonctionnement très intéressant de la chambre à étincelles avec ce dispositif particulier.

Avec une tension sur "l'espace étincelles" correspondant au fonctionnement en compteur (avec avalanches) c'est-à-dire un peu inférieure à la tension de claquage statique normale, lorsque la tension sur l'espace détecteur devient inférieure à une centaine de volts environ, il se produit en présence d'une source des étincelles assez nombreuses. Le nombre d'étincelles sans source est très faible, de l'ordre de 1/s. Ces étincelles donnent une bonne localisation de la source et traduisent même les différences d'homogénéité. Dans ces conditions, il se produit spontanément, sans électronique extérieure autre que les alimentations, une étincelle localisant le rayonnement détecté : on a donc un appareil très simple répondant aux caractéristiques cherchées. L'étude de cet appareil est faite dans le chapitre suivant (IV).

Remarque : Un montage à 3 électrodes a été essayé également dans un autre laboratoire, mais dans des conditions différentes [28]. Le déclenchement de la chambre est commandé à partir d'un détecteur extérieur ou par des impulsions récurrentes et la tension de repos dans "l'espace étincelles" est très faible. Dans ces conditions, le nouveau mode de fonctionnement décrit ci-dessus ne peut se produire.

4 - CONCLUSION SUR LES ESSAIS DE CHAMBRE AUTO-DECLENCHEE :

Ce chapitre a montré qu'il est possible de déclencher une étincelle localisée, commandée à partir de l'avalanche primaire provoquée par la particule à détecter. Nous avons obtenu des résultats pratiques corrects avec des chambres ayant un "espace étincelles" de 5 mm et avec des diamètres utiles de 70 et 160 mm, le remplissage étant de 1 atmosphère d'argon méthane. Quand la pression décroît, le rendement baisse et la localisation surtout semble plus difficile. On peut obtenir une bonne localisation et un rendement de l'ordre de 1 pour des particules β , avec 2 électrodes. Pour des particules X et γ de faible énergie, il est nécessaire d'avoir un montage à trois électrodes.

Le rendement de déclenchement augmente avec la tension appliquée U_A mais pour que la localisation soit correcte, il ne faut pas que la tension U_A soit trop proche de la tension disruptive U_d . ($U_A < U_d - 50$ V). Le rendement augmente aussi avec l'amplitude de l'impulsion de haute tension appliquée, mais à partir d'une certaine valeur de celle-ci, il se produit des décharges parasites. Le rendement et la localisation semblent meilleurs aussi lorsque le retard de l'impulsion de haute tension devient plus petit et son temps de montée plus bref.

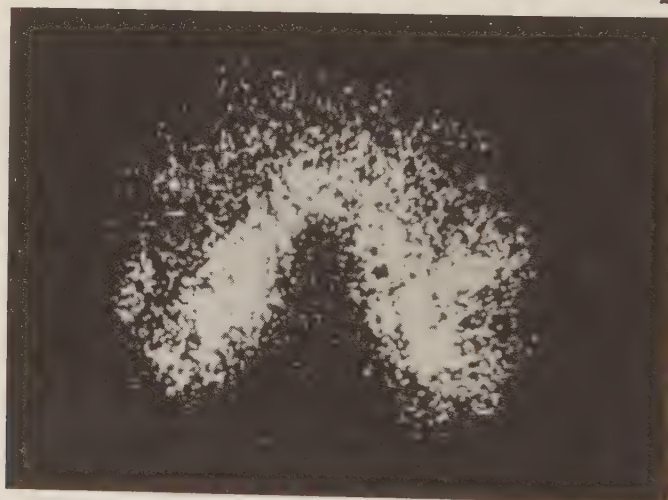
LOCALISATION DUN EMETTEUR X AVEC LA CHAMBRE A 3 ELECTRODES

- source: ^{125}I ($100\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$) (total 1,8 m Ci)
- fantôme de thyroïde

1. IMAGES DE LA SOURCE DONNEES PAR LA CHAMBRE :

- gaz: 1 atm. argon méthane
- espace cathode grille = 12 mm
- espace grille anode = 5 mm
- grille collimatrice : (bronze)
épaisseur = 10 mm
trous = ϕ 2 mm
- distance entre centres = 4 mm
- source à 3 cm du collimateur
- $U_A = +6000 \text{ V}$ ($U_d = 6100 \text{ V}$)
- $U_G = 0$
- $U_K = -200 \text{ V}$
- polaroid 42 - pose = 1/4 h

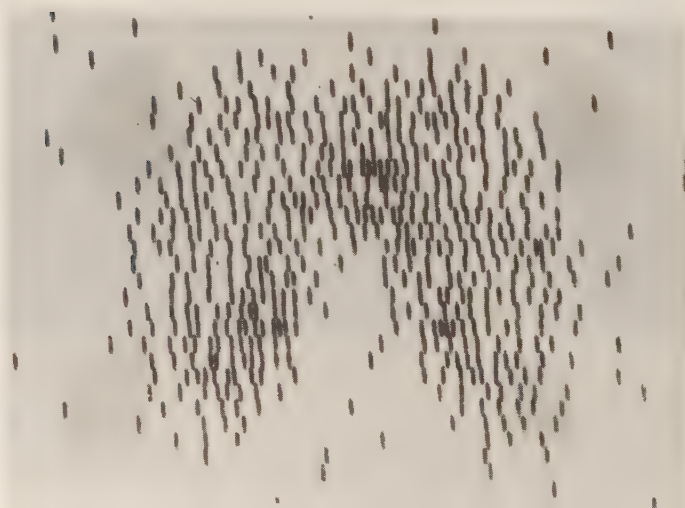
- a) ouverture : F/16
- b) ouverture : F/11



0 1cm

2. SCINTIGRAMME DE LA SOURCE

- balayage : 400 mm/minute
- précompte : 18
- comptage dans la bande encadrant le pic photoélectrique de 27 keV
- collimateur : $\phi = 1,2 \text{ cm}$ $h = 6,5 \text{ cm}$
- rayonnement atténué par 0,3mm de crysocal



L'influence de ces paramètres, cependant, n'a pas pu être étudiée en détail. Il en est de même des phénomènes physiques qui entrent en jeu et qui sont très certainement les avalanches secondaires données par les photons. En effet, cela nécessite une électronique très sensible pour rendre utilisables toutes les impulsions données par les particules détectées et en même temps très stable en présence d'étincelles qui donnent des perturbations importantes. Les premiers dispositifs étudiés ont simplement permis d'obtenir des résultats pratiques corrects. A partir des essais effectués avec les montages à transistors, une électronique transistorisée rapide et mieux adaptée a été construite par le S.E.R. à Grenoble; associée à un transistor avalanche suivi d'un tube haute tension ou d'un éclateur, elle devait permettre de faire cette étude. Celle-ci, malgré son intérêt, n'a pas été poursuivie, elle a été remplacée par l'étude et la mise au point technologique du nouveau système de chambre découvert qui, par sa simplicité de conception, semble très prometteur. Le type de chambre précédent peut cependant rester intéressant dans certains cas, lorsque par exemple il faut discriminer les particules à détecter.

IV - ETUDE DE LA CHAMBRE A ETINCELLES A TROIS ELECTRODES FONCTIONNANT AVEC UNE HAUTE TENSION CONTINUE

1.- GENERALITES : DESCRIPTION DES DISPOSITIFS ET DES METHODES D'ETUDE UTILISES :

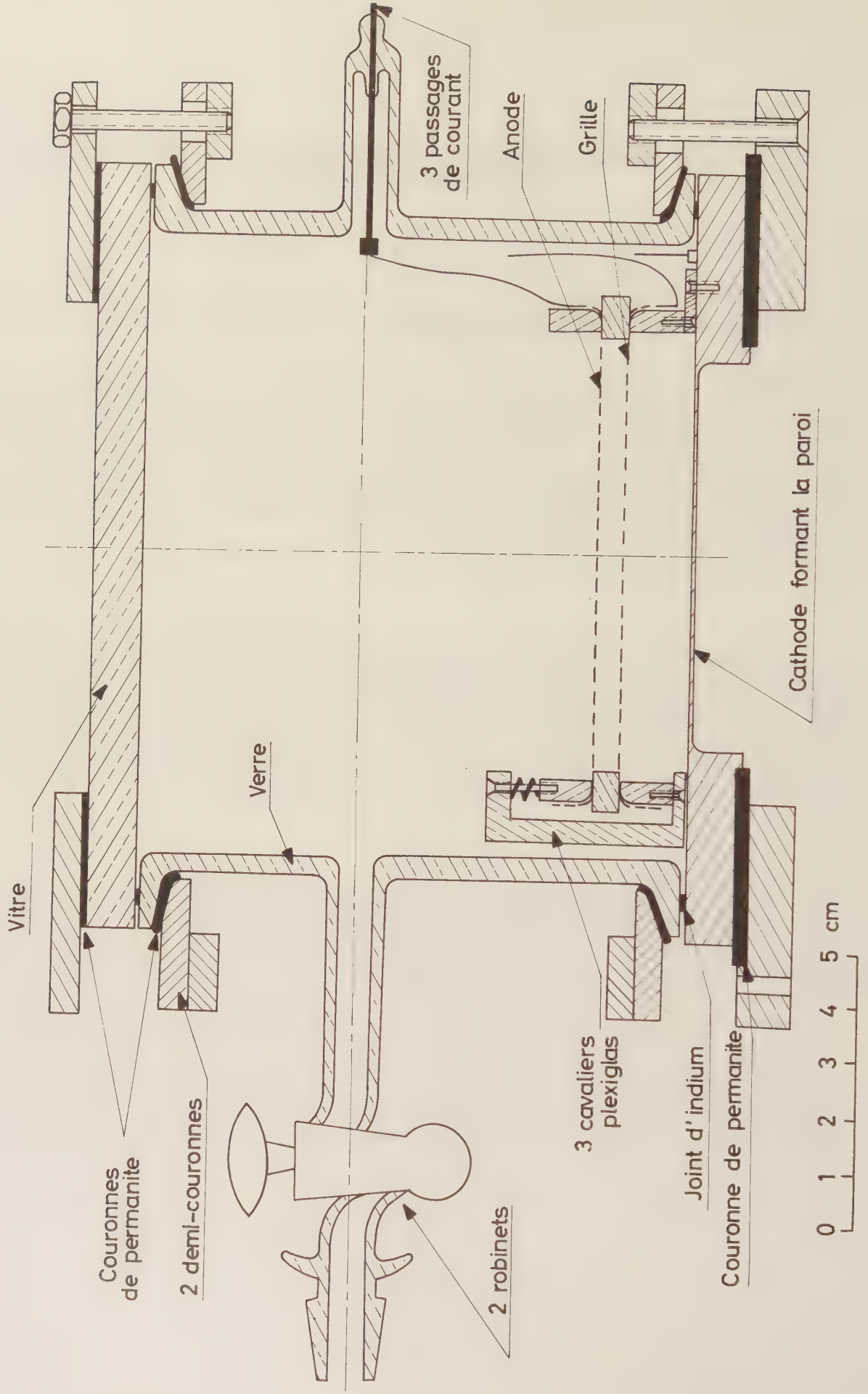
a) Généralités

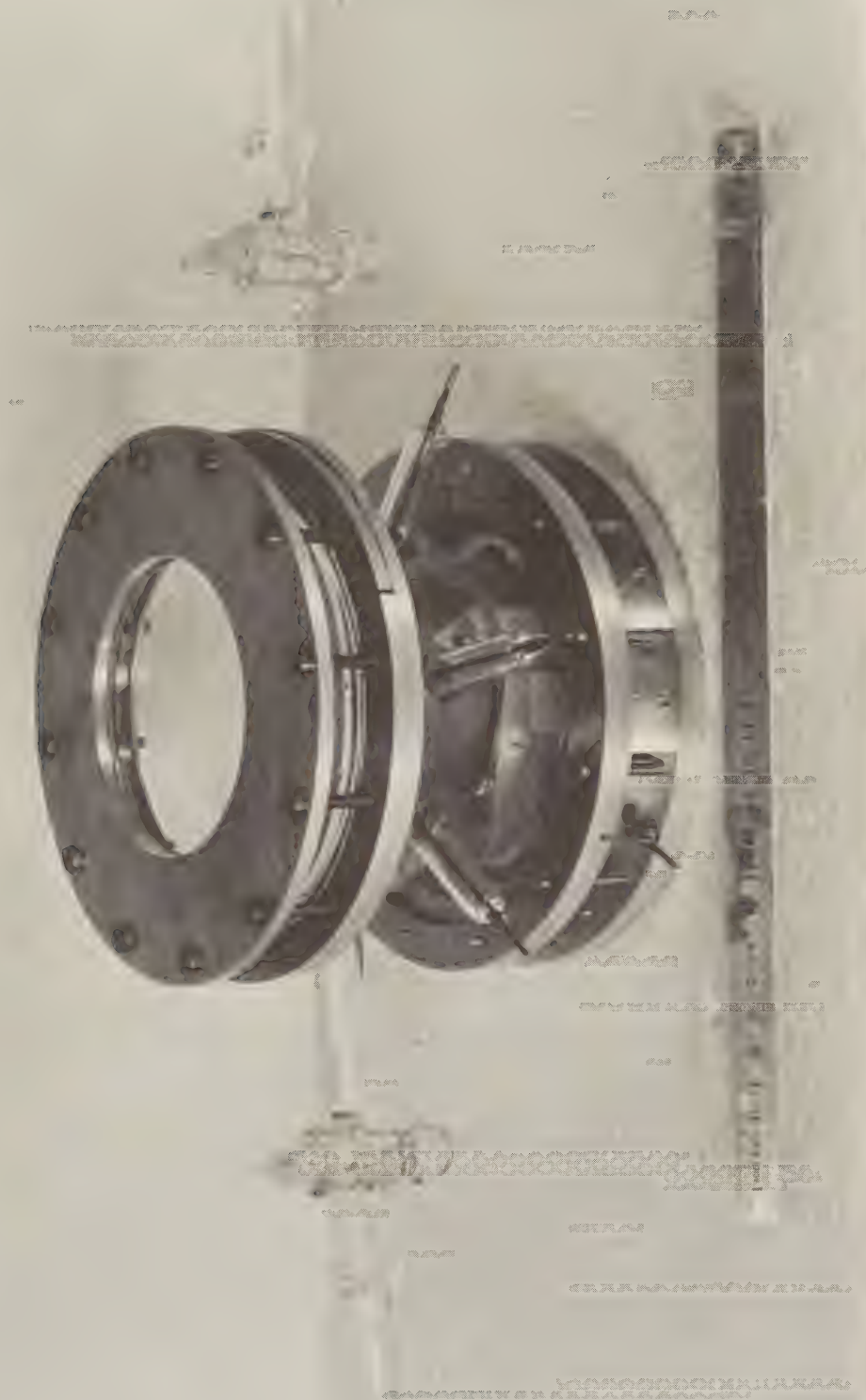
Ce nouveau mode de fonctionnement de chambre à étincelles a été mis en évidence en étudiant le déclenchement des étincelles avec le dispositif à 3 électrodes. Avec ce montage, il peut se produire une étincelle directement sur l'avalanche électronique sans l'intermédiaire d'un signal de haute tension et l'étincelle localise le point de passage de la particule ionisante. La chambre nécessite simplement deux tensions continues pour polariser les électrodes. Par rapport aux premières chambres à étincelles fonctionnant avec une haute tension continue, elle possède des performances supérieures, sa construction et son emploi sont plus faciles.

La chambre est formée de trois électrodes planes parallèles appelées cathode (K), grille (G) et anode (A) par analogie au tube triode. Ces électrodes sont placées dans une enceinte contenant un mélange de gaz rare et de vapeur organique ; le mélange utilisé à une pression de une atmosphère contient 90 % d'argon U et 10 % de méthane 99,9. L'espace compris entre la cathode, polarisée négativement, et la grille, reliée à la masse, est appelé "espace détection"; pour la plupart des mesures, il est de l'ordre de 10 mm. L'espace compris entre la grille et l'anode, reliée à une haute tension positive, est appelé "espace étincelles"; il est de l'ordre de 5 mm.

Les électrons primaires formés par l'action d'une particule ionisante dans "l'espace détection" sont collectés vers la grille. Une partie de ces électrons passe, à travers la grille, dans "l'espace étincelles"; ils sont multipliés sous forme d'avalanches électroniques et ils donnent une étincelle localisée. Ce fonctionnement est obtenu avec une tension U_A de l'ordre de 6500 V sur l'espace étincelles et une tension U_K comprise entre 0 et quelques centaines de Volts sur l'espace détection. Avec une tension plus négative sur l'espace détection, il n'y a pratiquement pas d'étincelles, sauf pour les tensions U_A voisines de la tension maximale limite U_L à laquelle se produit une suite de décharges parasites. Le nombre d'étincelles obtenues varie dans de grandes proportions avec les tensions appliquées U_A et U_K ; ces variations suivent des courbes qui sont caractéristiques du fonctionnement de ce type de chambre. Dans de bonnes conditions, il est possible d'obtenir environ une étincelle pour chaque particule détectée avec un bruit de fond de l'ordre de une étincelle par seconde. Le rendement et

CHAMBRE DE PETITE SURFACE EN VERRE





1. (supports en plexiglas)

3. (supports en laiton avec la cathode)

2. (électrodes pour chambre de grande surface)



la localisation varient avec l'énergie du rayonnement X utilisé. Ils sont aussi influencés par la valeur du circuit RC d'anode, par la nature des matériaux et du gaz utilisé; la température ambiante et l'exposition à la lumière ont également une certaine importance. Les performances et la stabilité de la chambre dépendent de tous ces paramètres.

Ce chapitre décrit d'abord rapidement le fonctionnement de la chambre employée avec une tension assez négative sur l'espace détection; ce fonctionnement est sensiblement analogue à celui obtenu avec une chambre à deux électrodes. Sont ensuite décrites les courbes caractéristiques du fonctionnement de la chambre, en fonction des tensions U_A et U_K appliquées sur l'espace étincelles et sur l'espace détection; un essai d'interprétation en est donné. Ce chapitre donne ensuite les résultats, rendement et localisation, obtenus avec divers rayonnements X. Il décrit enfin l'influence de différents paramètres sur les performances et la stabilité de la chambre.

Cette étude est faite en comptant les étincelles obtenues dans diverses conditions et en contrôlant leur localisation. L'observation de la forme des impulsions données par les avalanches électroniques avant les décharges, la mesure de leur nombre d'électrons et de leur durée donnent des renseignements précieux pour l'interprétation des phénomènes.

b) Montages d'étude utilisés :

Deux types de chambres sont utilisés. La plupart des essais sont faits avec une chambre de petite surface (ϕ utile de 7 cm) décrite ci-dessous. Quelques essais, dont la détermination de la définition, sont faits avec la chambre de ϕ utile 16 cm utilisée au chapitre III (planches 20 et 21).

La chambre de petite surface a une enceinte cylindrique en verre soufflé (ϕ int. = 110 mm h = 100 mm). Elle est munie latéralement de 3 passages de courant, tiges de tungstène soudées sur le verre, et de deux robinets. Les extrémités inférieure et supérieure sont élargies et rodées à plat pour le montage. La fenêtre supérieure, disque de verre d'épaisseur 10 mm, et la paroi inférieure sont serrées sur les épanouissements par des couronnes de duralumin. L'étanchéité est assurée par deux joints d'indium. La paroi inférieure sert de cathode et les deux autres électrodes y sont fixées mécaniquement (voir pl. 23 et 24).

Les électrodes sont données (Pl. 23 et 25).

La cathode est un disque en duralumin avec une partie centrale mince (quelques dixièmes de millimètre). Dans un montage, la partie centrale est surélevée pour permettre d'obtenir un espace détection faible. Un disque de béryllium, d'épaisseur 1 à 2 mm, sert de cathode pour l'étude des rayonnements de faible énergie.

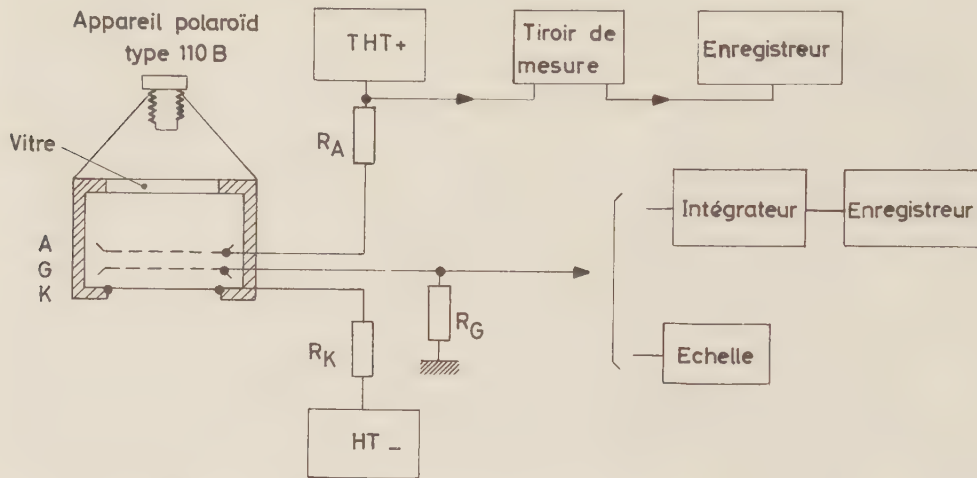
La grille et l'anode sont des électrodes identiques constituées par un tamis en acier inoxydable ayant un fil de diamètre 0,04 mm et un pas de 0,08 ou 0,165 mm. Le tamis est collé sur une couronne de plexiglas (Pl. 23 et 25-1), il est tendu par un montage mécanique pendant le collage. Dans un montage, le tamis est soudé sur une couronne de laiton, il est tendu par une 2ème couronne vissée sur la 1ère (Pl. 25-3).

Par raison de commodité, la grille collimatrice n'est pas fixée sur la chambre mais sur un petit container de plomb dans lequel est enfermée la source (Pl. 39).

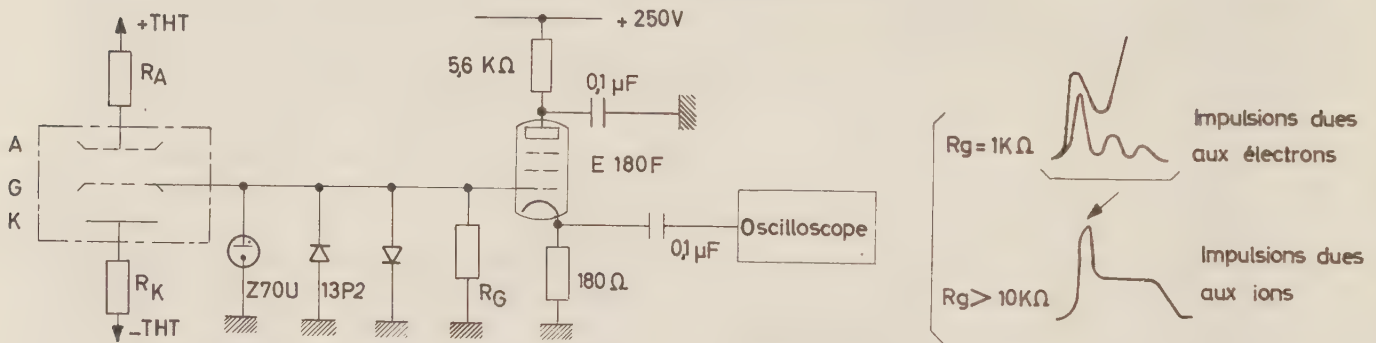
Les chambres ne sont pas soumises à des dégazages ou à des traitements spéciaux. Elles sont simplement montées avec soin pour éviter les poussières, le parallélisme des électrodes est assuré à 0,1 mm; le vide avant un remplissage est de 10^{-2} mm de mercure.

PL: 26 DISPOSITIF ELECTRIQUE D'ETUDE DES ETINCELLES ET DES AVALANCHES

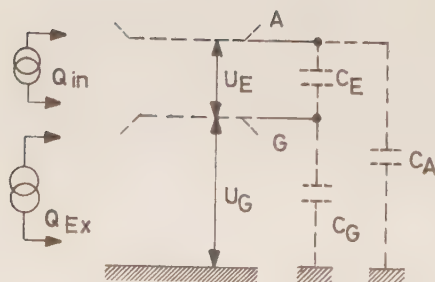
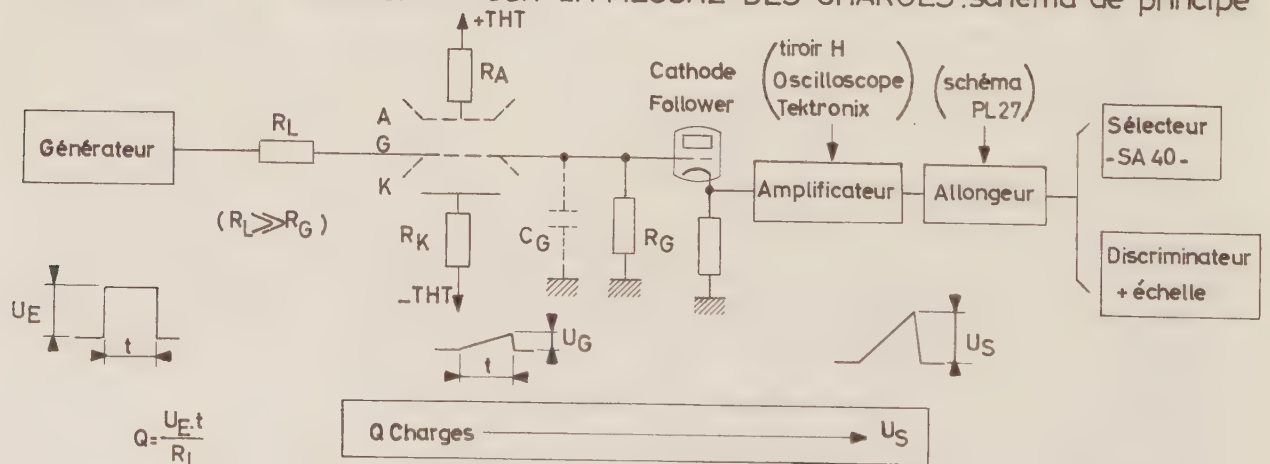
a) DISPOSITIF D'ETUDE DES ETINCELLES



b) DISPOSITIF ELECTRIQUE D'ETUDE DES AVALANCHES



c) ETALONNAGE DU DISPOSITIF POUR LA MESURE DES CHARGES : schéma de principe



$$U_E = Q_{in} \cdot \frac{1}{C_E + \frac{C_G \cdot C_A}{C_G + C_A}}$$

$$\text{et } U_G = U_E \cdot \frac{C_A}{C_A + C_G}$$

$$U_G = Q_{in} \cdot \frac{1}{C_G + C_E \cdot \frac{C_A + C_G}{C_A}}$$

$$U_G = Q_{Ex} \cdot \frac{1}{C_G + \frac{C_E \cdot C_A}{C_E + C_A}}$$

$$\begin{aligned} C_G &= 30 \text{ pF} \\ C_E &= 10 \text{ pF} \\ C_A &= 5 \text{ pF} \\ U_G &= \frac{k}{33} Q_{Ex} \\ U_G &= \frac{k}{100} Q_{in} \end{aligned}$$

c) Dispositifs de mesure utilisés : (Pl. 26)

Les étincelles sont comptées avec une échelle, l'évolution du taux de comptage est donnée par un intégrateur suivi d'un enregistreur. La position des étincelles est donnée par un appareil photographique placé dans une chambre noire au-dessus de la chambre. La haute tension appliquée sur l'anode est mesurée d'une manière précise par une méthode d'opposition : un dispositif permet d'obtenir, pour toutes valeurs de la haute tension, une déviation de toute la gamme d'un enregistreur pour une variation de 100 V ce qui permet d'apprécier des différences de quelques volts

Les impulsions d'avalanches sont étudiées par une méthode électrique qui donne les variations du courant sur les électrodes et par une méthode optique qui donne les variations de la lumière émise

Méthode électrique d'étude des avalanches : mesure du nombre d'électrons

Les impulsions de courant provoquées par les avalanches sont recueillies sur la grille de la chambre et transmises à un oscilloscope par l'intermédiaire d'un "cathode follower". Une résistance de grille de l'ordre de 1 k Ω permet d'obtenir l'impulsion due au mouvement des électrons pendant l'avalanche. Une résistance supérieure à 10 k Ω intègre les charges apportées par les électrons et donne le signal dû à la migration des ions après l'avalanche (Pl. 26 b).

L'impédance faible permet de voir la variation, dans le temps, de la quantité d'électrons contenus dans l'avalanche et d'observer le signal du début de formation de l'étincelle

L'impédance forte, après étalonnage du circuit électronique, permet de mesurer le nombre total de charges Q_e produites sur la grille par le mouvement des électrons de l'avalanche. En ajustant l'impédance de charge pour obtenir une impulsion rectangulaire, il est possible de connaître le coefficient α de multiplication dans l'avalanche ($\alpha = \frac{1}{R C_{gr}}$) et de déterminer approximativement le nombre d'électrons Q_T contenus dans cette avalanche

$$(Q_T = \alpha \cdot d \cdot Q_e) \quad (CF : II-1-1-a)$$

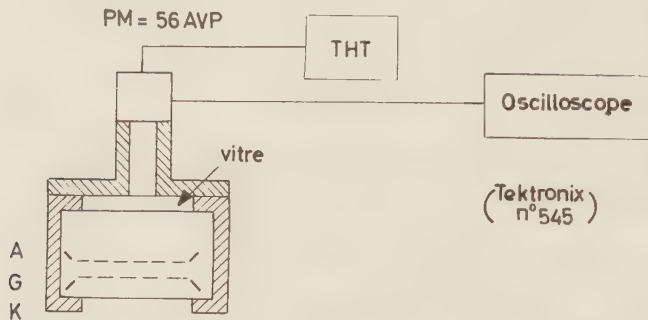
L'étalonnage de l'électronique est fait avec un générateur d'impulsions carrées selon le principe suivant (Pl. 26-c) : le générateur injecte, sur la grille, à travers une grande résistance R_1 , les charges données par une impulsion carrée d'amplitude U_E et de durée t : cela donne une impulsion d'amplitude U_S à la sortie de l'électronique. Lorsque la résistance de grille R_g est supérieure à 40 k Ω et que t est inférieur à 0,4 μs , la tension U_S ne varie pratiquement pas avec R_g et est proportionnelle à t (car alors $R_g C_g \gg t$); U_S est donc proportionnelle au nombre de charges injectées Q_G ($Q_G = \frac{U_E t}{R_1}$) et

on connaît ainsi la tension de l'impulsion de sortie correspondant à un nombre déterminé de charges sur la grille

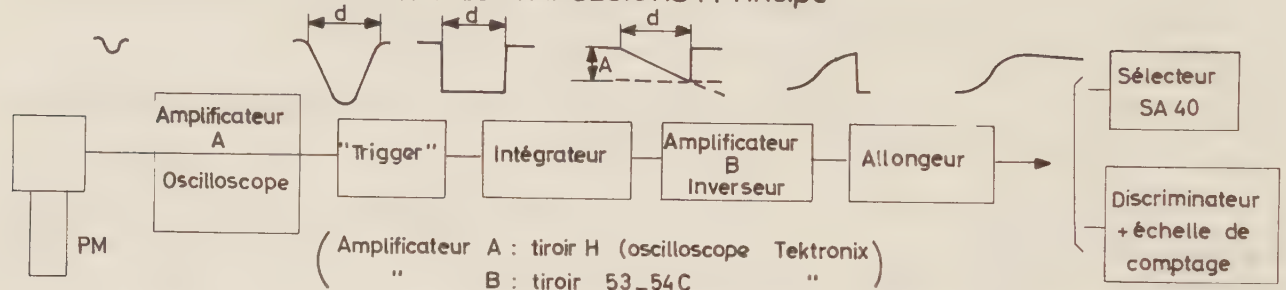
Cependant les charges données par le générateur sont appliquées entre la grille et la masse alors que les charges données par l'avalanche sont appliquées entre la grille et l'anode de la chambre. Une correction est donc nécessaire pour avoir l'étalonnage de U_S en fonction des charges données sur la grille par l'avalanche (voir Pl. 26 d). Si la tension U_S est obtenue avec une charge Q_G donnée par le générateur, elle est obtenue avec une charge $Q_e = 3 Q_G$ donnée par l'avalanche.

Remarque : Un circuit allongeur est placé entre l'amplificateur et le dispositif d'analyse (sélecteur ou discriminateur) afin de rendre la mesure de l'amplitude de l'impulsion U_S indépendante de sa durée (voir Pl. 27 d).

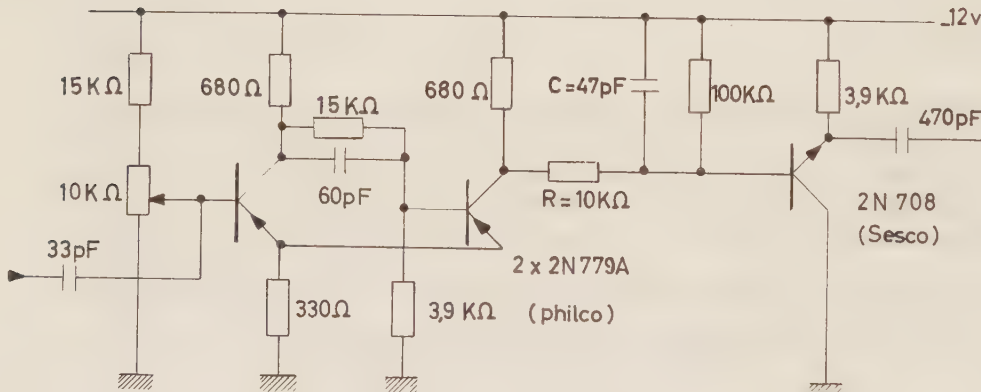
a) DISPOSITIF EMPLOYE



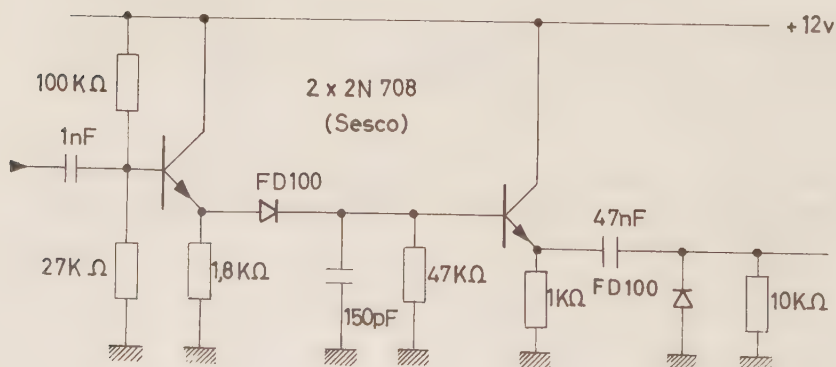
b) MESURE DE LA DUREE DES IMPULSIONS : Principe



c) SCHEMA DU "TRIGGER" ET DE L'INTEGRATEUR



d) SCHEMA DU CIRCUIT ALLONGEUR :



Méthode optique d'étude des avalanches : mesure de la durée :

Les photons émis pendant les avalanches sont détectés par un photomultiplicateur, 56 AVP, placé sur la fenêtre de la chambre à la place de l'appareil photographique (Pl. 27-a). Les impulsions obtenues sont analogues aux impulsions de courant recueillies avec une faible résistance de grille mais la sensibilité est plus grande. Ce dispositif est aussi employé pour mesurer la durée des impulsions données par les avalanches. Le montage électronique de mesure (Pl. 27 b et c) est composé d'un "trigger" à seuil fixe, qui donne une impulsion d'amplitude fixe et de durée égale à celle de l'impulsion d'avalanche, suivi d'un intégrateur qui donne une impulsion d'amplitude proportionnelle à la durée de l'impulsion d'avalanche; un étalonnage est fait avec un générateur d'impulsions carrées de durées connues.

2.- CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT DE LA CHAMBRE A ETINCELLES A 3 ELECTRODES

1- Courbes caractéristiques de fonctionnement en fonction des tensions appliquées sur «l'espace étincelles» et sur «l'espace détection»

a) Fonctionnement avec une tension assez négative sur l'espace détection : $U_K = 400 \text{ V}$.

L'étude des avalanches électroniques qui se produisent avant les décharges montre que le fonctionnement de la chambre est alors à peu près analogue à celui d'un montage à deux électrodes.

Evolution des avalanches lorsque la tension U_A varie :

Les avalanches observées à l'aide d'un "cathode follower" à faible impédance de grille évoluent de la même façon que dans un montage à 2 électrodes (Pl. 28). Lorsque U_A croît, le pic principal, dû à l'avalanche primaire, croît; quelques pics secondaires apparaissent progressivement et croissent également. Lorsque U_A atteint la tension de décharge U_d , des étincelles prennent naissance sur une des avalanches secondaires selon le processus décrit (II-1-1b) (Pl. 2-2-a).

Le spectre de répartition du nombre d'électrons, contenus dans des avalanches obtenues dans les mêmes conditions, donne une courbe en cloche assez étroite dans le cas d'un rayonnement de 6 keV donné par une source de ^{55}Fe . (Pl. 29). En effet, lorsqu'un rayonnement X donne une interaction dans l'espace détection, les électrons formés arrivent dans l'espace étincelle au niveau de la grille et ils subissent tous l'amplification maximale.

La courbe de variation du nombre moyen d'électrons par avalanche, en fonction de la tension U_A , présente une rupture de pente quand les effets secondaires deviennent importants et que commencent les étincelles (Pl. 29). Le nombre d'électrons par avalanche est alors de l'ordre de 10^8 et le coefficient α de multiplication de l'ordre de 27 - ($\alpha d = 13,5$). Ces valeurs déterminées (Pl. 29) par la méthode précédemment décrite (4-1-c) correspondent aux résultats déjà publiés par d'autres auteurs [6].

D'après les résultats trouvés, la multiplication dans l'avalanche (avec un coefficient αd de 13,5) serait ($\alpha \cdot d$) de l'ordre de $7,5 \cdot 10^5$ ce qui correspondrait à une centaine d'électrons primaires donnés par l'effet photoélectrique des X de 6 keV.

Variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_A :

La courbe de variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_A est donnée Pl. 29. La plage de tension donnant des étincelles en dessous de la tension limite U_L à laquelle se forme une suite de décharges parasites, est réduite; elle est de l'ordre de 50 V pour des tensions de l'ordre de 6500 V. Le nombre d'étincelles que peut donner une source est faible par rapport aux interactions qu'elle produit dans l'espace de détection (sauf au voisinage immédiat de U_L). La courbe ne présente pas de plateau de comptage; en effet la chambre n'a pas subi tous les traitements spéciaux nécessaires aux chambres à étincelles fonctionnant en continu et le mélange gazeux employé donne des effets

PL: 28 INFLUENCE, SUR LES AVALANCHES ELECTRONIQUES, DE LA TENSION, U_A , APPLIQUEE SUR "L'ESPACE ETINCELLES"

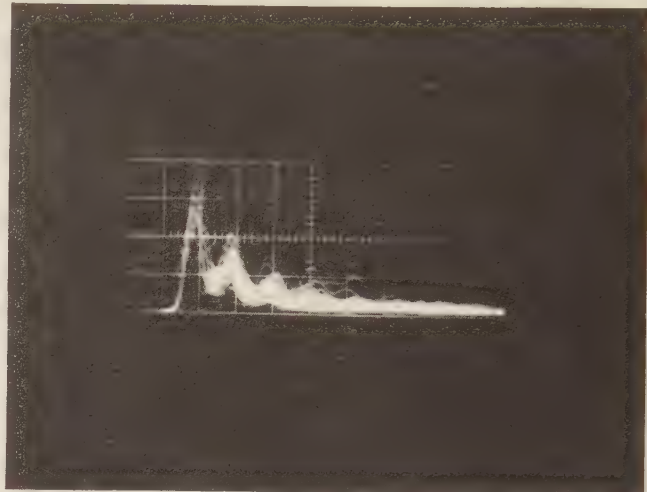
ETUDE PAR LA METHODE ELECTRIQUE 1

- gaz: 1 atm. argon méthane
- source : ^{109}Cd
- $U_L = 6750 \text{ V}$
- $U_K = -400 \text{ V}$
- $R_G = 1 \text{ K}\Omega$
- Polaroid 47 - F/1,9
- $5 \text{ mV} / \text{carreau}$
- $100 \text{ ns} / \text{carreau}$

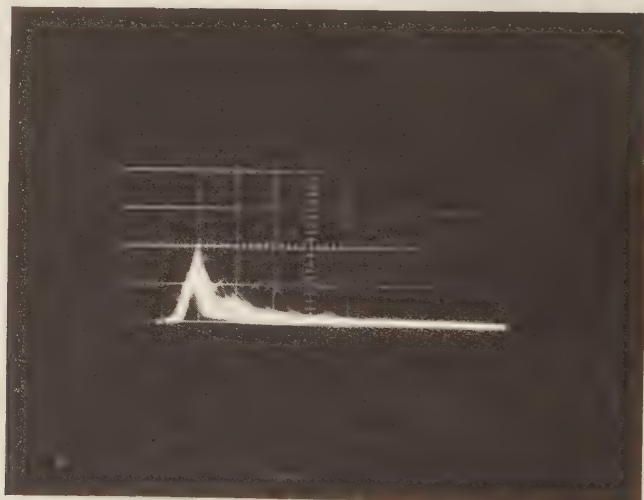
- 1- $U_A = 6700 \text{ V}$

- 2- $U_A = 6600 \text{ V}$

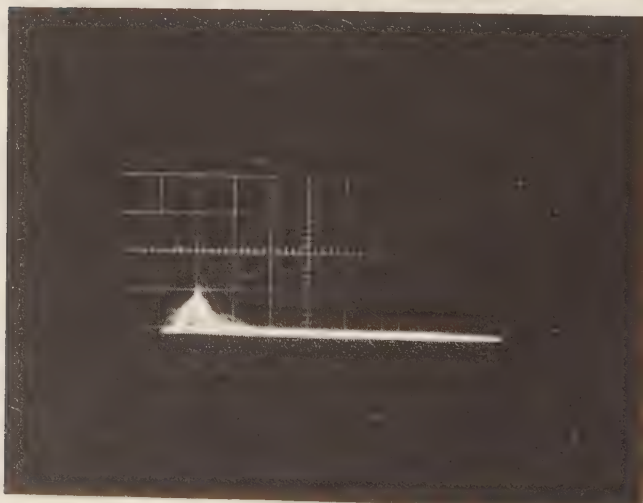
- 3- $U_A = 6500 \text{ V}$



2



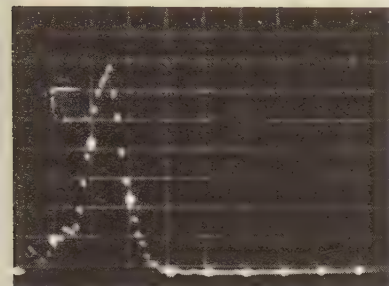
3



FONCTIONNEMENT DE LA CHAMBRE AVEC UNE TENSION U_K TRES NEGATIVE

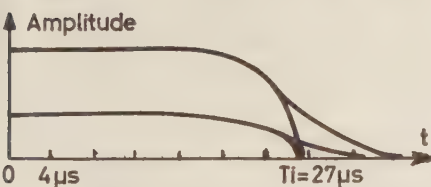
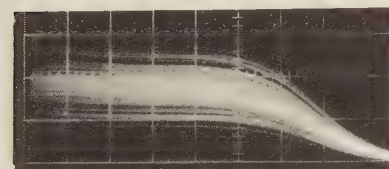
- Spectre du nombre d'électrons par avalanche, recueillis sur la grille :

$U_A = 6625V$ $U_K = -400V$



- Le 100° canal correspond à : $3 \cdot 10^7$ électrons
- Le 24° canal qui représente le nombre moyen correspond à : $Q_e = 7,2 \cdot 10^6$ électrons recueillis sur la grille

- Impulsions d'avalanche



- $R_K = 68K\Omega$ (pour obtenir un plateau)

- Nombre d'électrons dans l'avalanche

$$\gamma_I = \frac{d}{T_i} = \frac{0,5}{27 \cdot 10^{-6}} = 18 \cdot 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$$

$$\alpha = \frac{1}{R \cdot C \cdot \gamma_I} \text{ avec } (C_G = 30 \text{ pF})$$

$$\alpha = 27 \cdot \text{cm}^{-1}$$

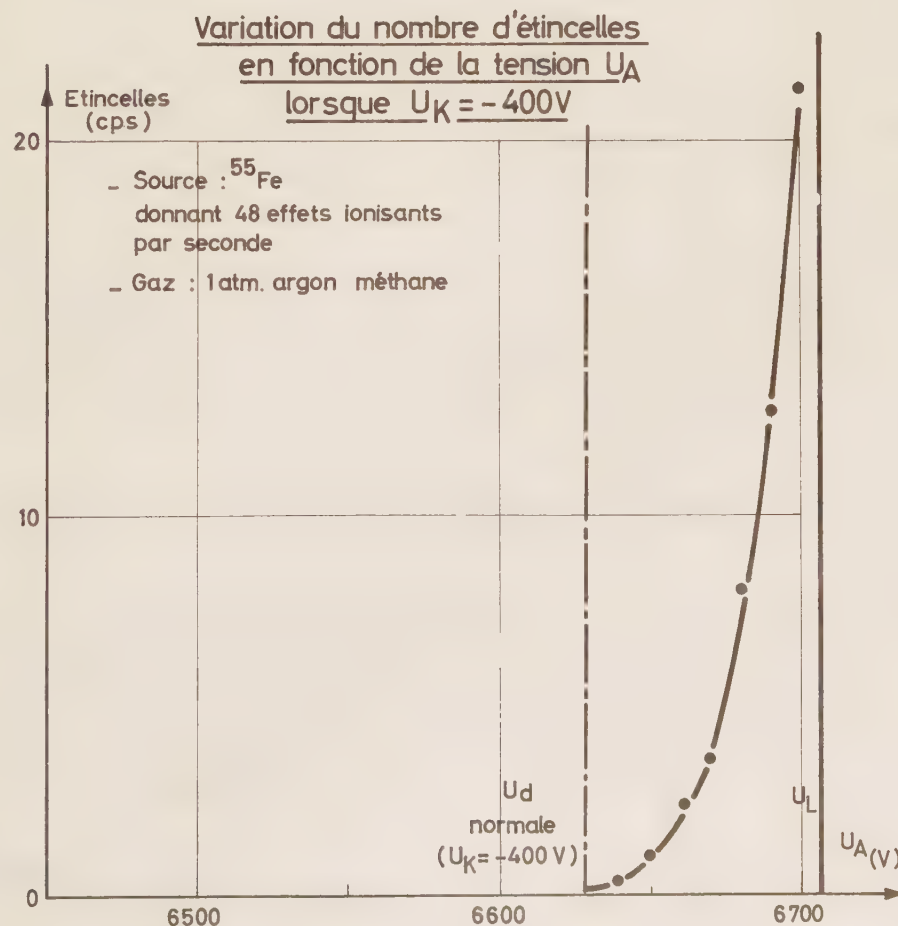
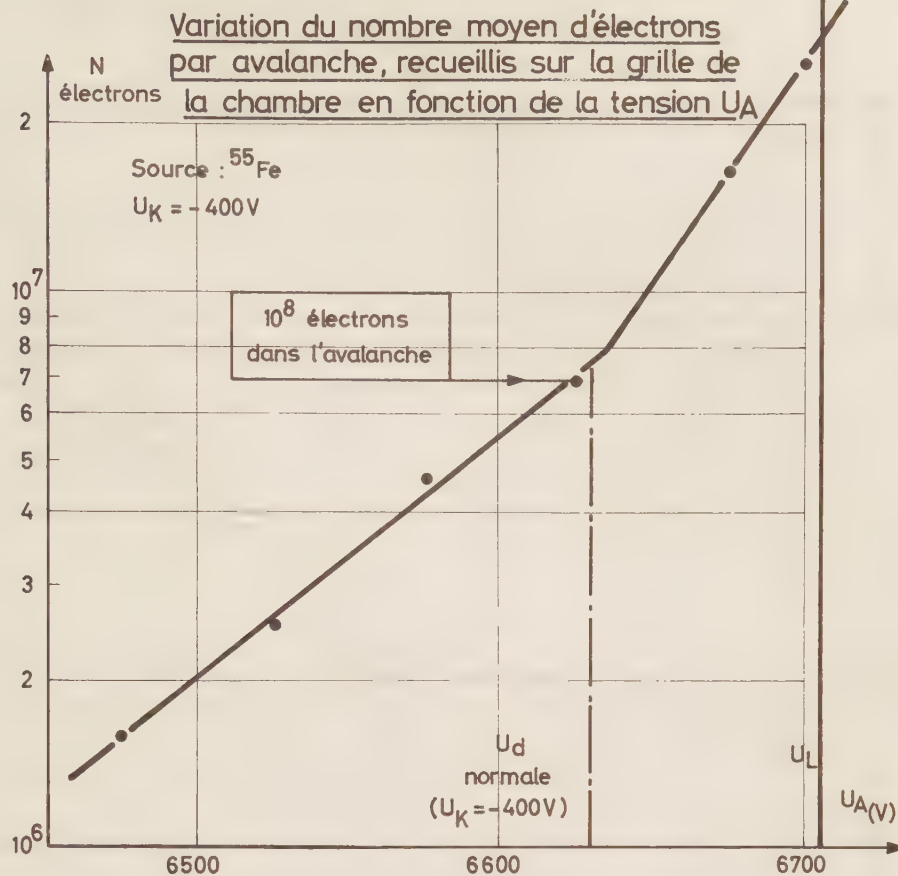
$$\alpha \cdot d = 13,5$$

- Le nombre d'électrons dans l'avalanche est :

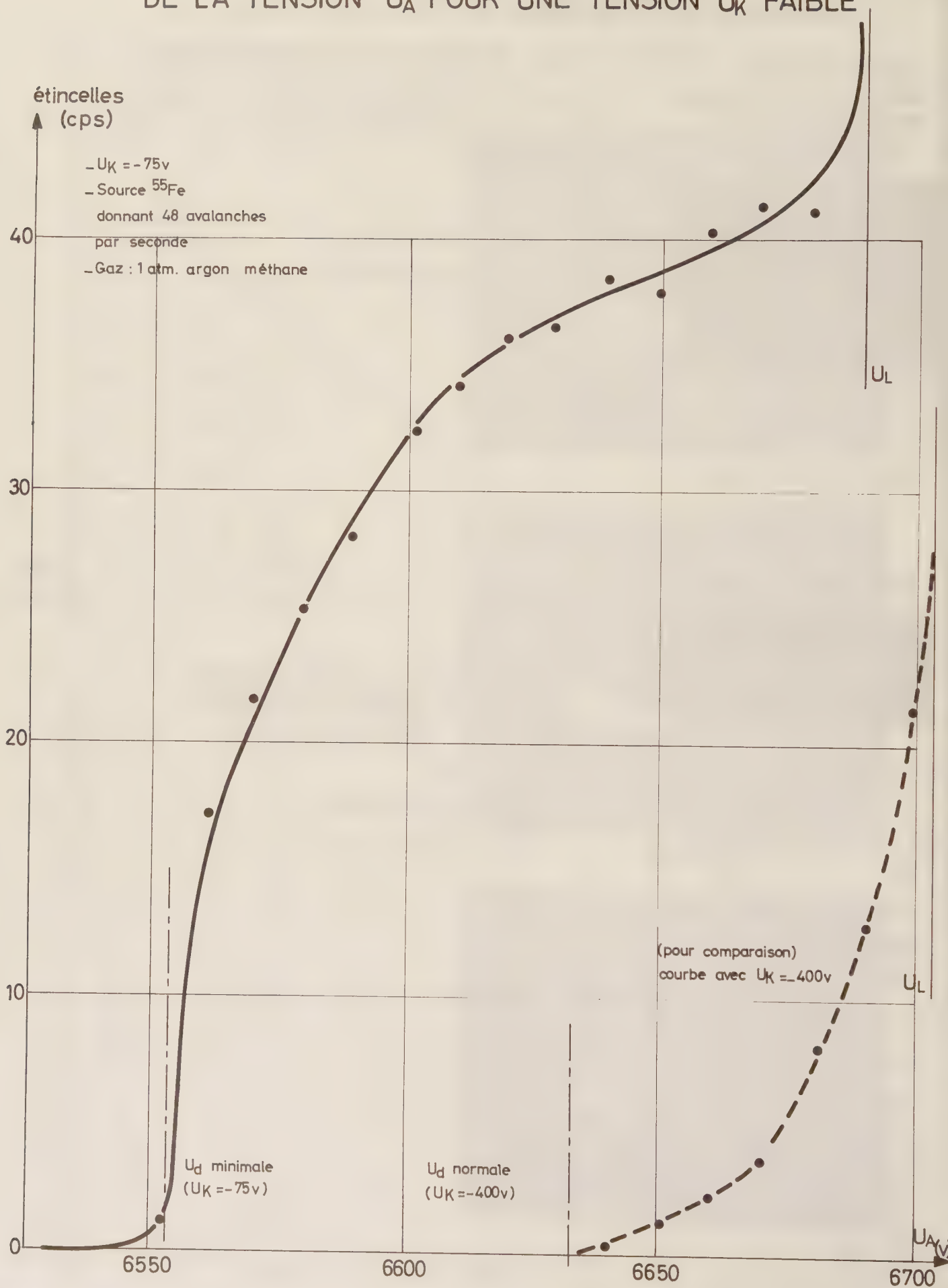
$$Q_T = \alpha \cdot d \cdot Q_e$$

$$Q_T = 9,7 \cdot 10^7$$

$$Q_T = 10^8$$



PL:30 VARIATION DU NOMBRE D'ÉTINCELLES EN FONCTION
DE LA TENSION U_A POUR UNE TENSION U_K FAIBLE



secondaires assez importants. Cependant, dans certains cas, avec d'autres mélanges gazeux, la chambre peut donner de bons résultats avec des tensions importantes sur l'espace détection.

b) Variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_A lorsque la tension appliquée sur l'espace détection est faible :

La courbe (Pl. 30) est caractéristique des variations du nombre d'étincelles obtenues avec une chambre fonctionnant dans de bonnes conditions. Avec une tension convenable sur l'espace détection, $U_K = -75$ V, les étincelles se produisent sur une plage de 100 à 200 V avec les X de 6 keV du ^{55}Fe (la plage est de 200 à 300 V pour des X de 22 keV (^{109}Cd) ou de 27 keV (^{125}I)). La courbe présente une sorte de plateau de comptage sur quelques dizaines de Volts, en dessous de la tension U_L , avec un nombre d'étincelles de l'ordre de grandeur du nombre de particules X détectées. Lorsque les conditions de fonctionnement sont moins bonnes, la courbe monte de manière régulière jusqu'à la tension U_L sans présenter de plateau. Avec le mélange gazeux utilisé, l'emploi d'une polarisation assez faible sur l'espace détection permet donc à la chambre de donner des étincelles avec une haute tension continue, sur l'espace étincelle, un peu plus faible que la tension de décharge, U_d , normale. Ce phénomène rend le fonctionnement moins critique et permet d'obtenir de bons résultats avec des chambres d'un montage nettement plus facile.

c) Variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_K appliquée sur l'espace détection :

La courbe (Pl. 31-1) est caractéristique des variations du nombre d'étincelles en fonction de U_K . Cette courbe est obtenue avec une tension U_A pas trop proche de la tension limite U_L et pour laquelle il n'y a pratiquement pas d'étincelles avec des tensions U_K très négatives.

Le nombre d'étincelles est maximal lorsque la tension U_K est de l'ordre de - 50 à - 100 V. Il décroît rapidement lorsque la tension U_K tend vers 0, la décroissance est plus ou moins lente lorsque la tension U_K tend vers des valeurs plus négatives; la courbe est plus étroite avec des rayonnements de faible énergie (Pl. 31-2).

La forme de la courbe varie avec la tension U_A . Lorsque la tension U_A décroît, le nombre maximal d'étincelles diminue, la plage de tension U_K qui donne des étincelles devient plus étroite et tend vers des valeurs plus faibles. Lorsque la tension U_A croît et tend vers la valeur limite, la décroissance du nombre d'étincelles pour les valeurs négatives de la tension U_K devient plus faible et à la limite la courbe est pratiquement plane. (Pl. 31-3 et 4).

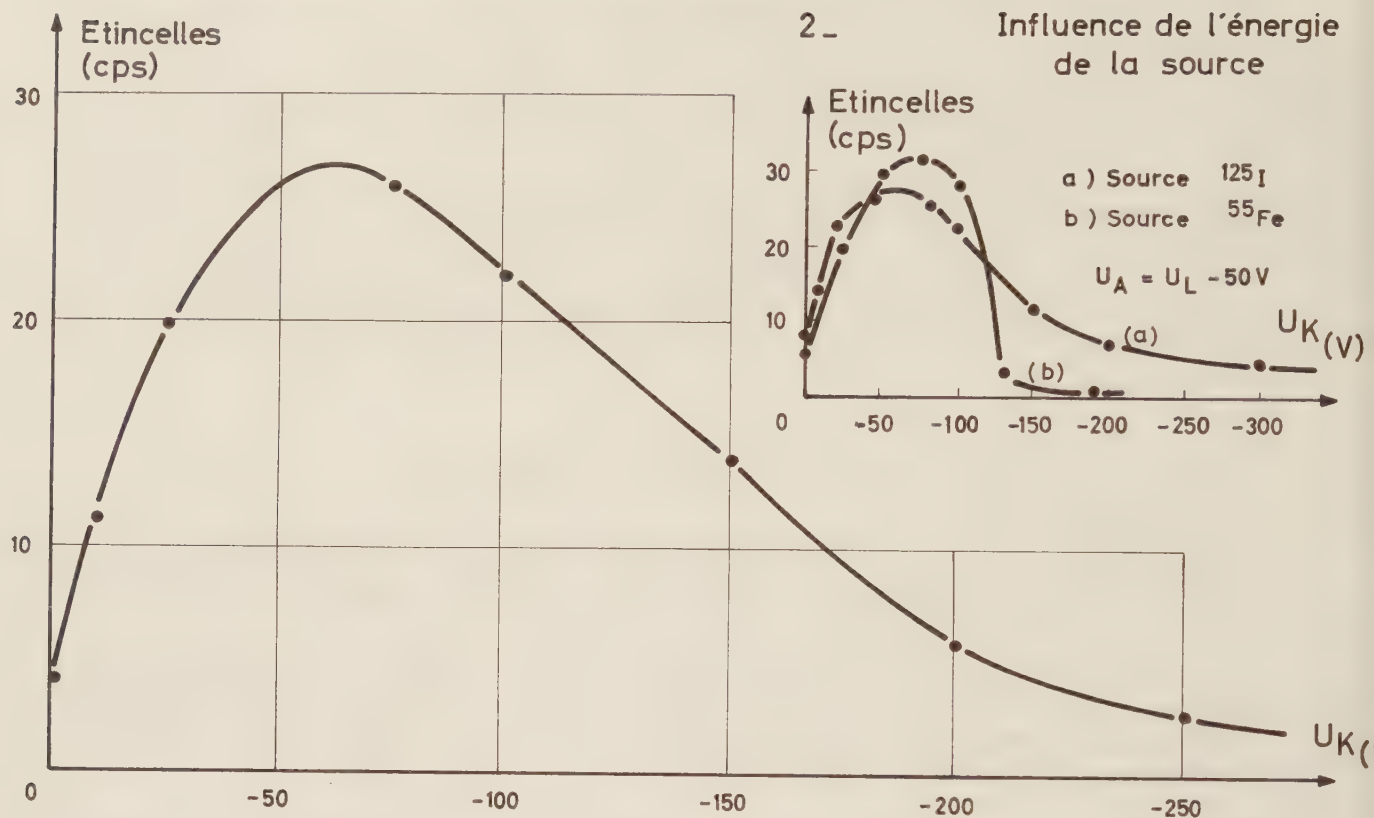
La forme de la courbe est également influencée par les divers paramètres physiques qui agissent sur le fonctionnement de la chambre (V.4-3-b) et (Pl. 48-2 et 3); ce fonctionnement est donc étroitement lié aux phénomènes qui ont lieu dans l'espace détection. L'étude des avalanches électroniques donne quelques précisions sur le rôle de l'espace détection dans la formation des étincelles et quelques explications sur la forme des courbes caractéristiques de comptage en fonction de U_K .

2- Evolution des avalanches électroniques lorsque la tension, U_K , sur l'espace détection varie :

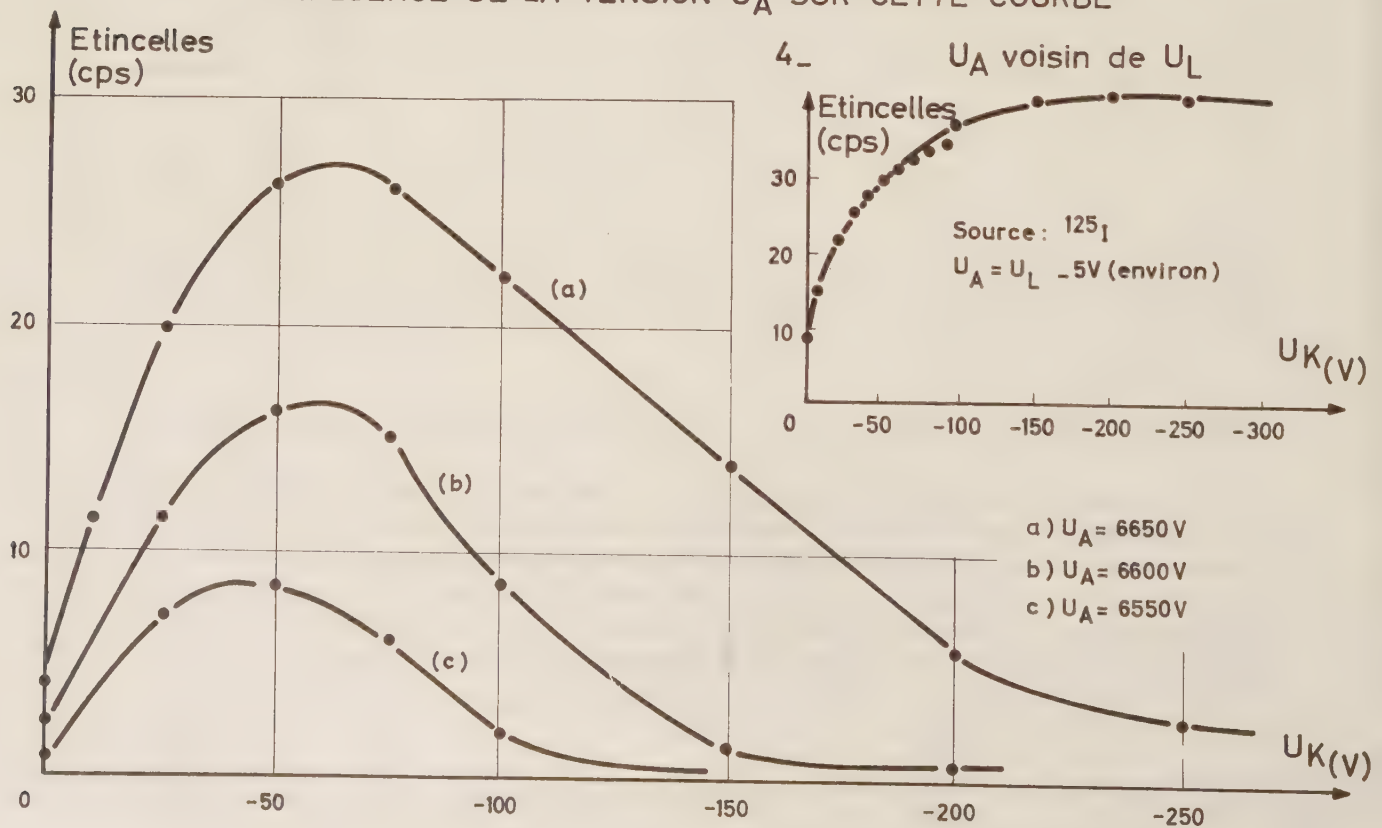
La forme des avalanches est profondément modifiée par les variations de la tension U_K . (voir Pl. 32a). Lorsque la tension U_K est très négative, l'impulsion a la forme classique déjà vue (Pl. 28). Lorsque la tension U_K devient moins négative, l'impulsion a une amplitude plus faible mais dure plus longtemps; elle peut durer plusieurs centaines de nanosecondes, avec des X de 22 keV (^{109}Cd) ou de 27 keV (^{125}I), pour les valeurs de la tension U_K donnant le maximum d'étincelles. Lorsque la tension U_K ensuite tend vers zéro, les impulsions sont de plus en plus petites.

PL:31 VARIATION DU NOMBRE D'ETINCELLES EN FONCTION DE LA TENSION U_K

- 1_ - Source ^{109}Cd
 - Gaz : 1 atm. argon méthane
 - $U_L = 6680 \text{ V}$
 - $U_A = 6650 \text{ V}$



3_ INFLUENCE DE LA TENSION U_A SUR CETTE COURBE



Il se produit deux phénomènes mis en évidence par les mesures de la durée des avalanches et de leur nombre d'électrons. Lorsque la tension U_K devient moins négative, les électrons primaires au lieu d'être groupés et multipliés en même temps sont étalés; ils donnent une avalanche globale moins importante, de manière instantanée, mais plus longue, composée de petites avalanches qui se suivent au lieu d'être simultanées (voir IV-2-2-b). Cette perturbation n'est pas provoquée par la présence d'étincelles car elle se produit également pour des valeurs de la tension U_A inférieures à la tension de décharge (Pl. 32b). Ce phénomène est provoqué par une dispersion des électrons primaires pendant leur collection lorsque le champ devient plus faible sur l'espace détection (voir IV-2-2-c). Lorsque U_K tend vers zéro il doit se produire une recombinaison ou un attachement des électrons primaires, ce qui diminue l'importance de l'avalanche. Cette diminution du nombre d'électrons dans les avalanches peut expliquer la diminution du nombre d'étincelles quand la tension U_K devient très faible. Par contre, l'étalement des avalanches auquel est liée la formation des étincelles ne provoque pas une augmentation importante du nombre d'électrons, dans les avalanches, pouvant expliquer sûrement l'origine de ces étincelles (voir IV-2-2-a).

a) Variation du nombre des électrons contenus dans une avalanche en fonction de la tension U_K :

Pour les avalanches créées par des particules X de 6 keV (^{55}Fe), le spectre de répartition du nombre d'électrons contenus dans les avalanches a une forme en cloche assez étroite lorsque la tension U_K est assez négative. Lorsque la tension U_K devient plus faible, le spectre se déforme, devient plus étalé vers les nombres d'électrons plus faibles (quand la tension U_K atteint une centaine de Volts environ). Lorsque U_K atteint des valeurs de l'ordre de - 50 V, le spectre prend une forme décroissante d'allure exponentielle, le nombre d'électrons contenus dans les avalanches diminue alors très rapidement. (Pl. 33). La tension U_K à laquelle le spectre commence à se déformer varie avec la qualité du gaz.

Il est intéressant de comparer les spectres obtenus d'une part lorsque la tension U_K correspond au comptage maximal en étincelles ($U_K = - 75$ V) et d'autre part lorsque la tension U_K est très négative ($U_K = - 400$ V) (voir Pl. 34-1) et cela pour différentes valeurs de la tension U_A . Ces mesures sont faites avec un gaz neuf avec lequel la déformation du spectre reste faible lorsque la tension U_K est de - 75 V. Lorsque $U_A = U_{\text{dmin}}$, le nombre moyen d'électrons est à peu près le même dans les 2 cas. Lorsque $U_A > U_{\text{dmin}}$, le nombre maximal d'électrons croît plus vite dans le cas $U_K = - 75$ V c'est-à-dire lorsqu'il y a des étincelles. Mais la différence reste faible et il est peu probable que ce soit elle qui provoque la formation des étincelles.

La planche (34-2) montre, d'une part, la variation, en fonction de la tension U_A , du nombre moyen d'électrons contenus respectivement dans les avalanches dues à des X de 6 keV (^{55}Fe) et dans d'autres dues à des X de 27 keV (^{125}I); ce nombre d'électrons est obtenu avec une même tension U_K très négative ($U_K = - 400$ V). Elle donne, d'autre part, la variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_A pour les 2 rayonnements et suivant 2 valeurs de la tension U_K ($U_K = - 75$ V et $U_K = - 400$ V). A la tension $U_A = 6575$ V, il n'y a pratiquement pas d'étincelles avec la source d'iode 125 si $U_K = - 400$ V et par contre si $U_K = - 75$ V le nombre d'étincelles obtenu avec la source de ^{55}Fe est environ le tiers du nombre maximal. Or, à cette tension, le nombre moyen d'électrons contenus dans les avalanches dues aux X de l'iode est environ 8 fois plus grand que celui contenu dans les avalanches dues aux X du fer. Bien que les traces données par les X de l'iode soient bien plus longues que celles données par les X du fer, le nombre d'électrons présents à l'extrémité des traces de l'iode dans une dimension analogue au diamètre de l'avalanche est certainement plus grand que dans le cas du fer.

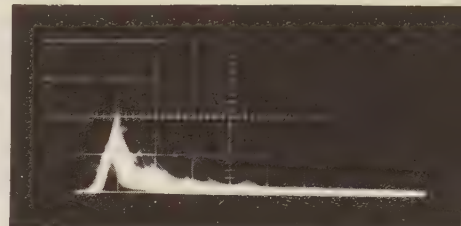
Il semble donc que pour une même tension U_A , l'étalement des avalanches provoqué par une faible valeur de la tension U_K favorise la formation de l'étincelle par un processus autre que l'augmentation du nombre d'électrons.

Les mesures ci-dessous précisent les valeurs de l'étalement des avalanches, et montrent que la formation des étincelles paraît directement liée à cet étalement.

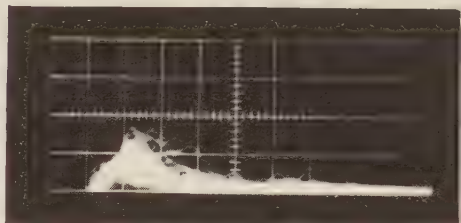
A. AVALANCHES AVEC FORMATION
D'ÉTINCELLES POUR LES TENSIONS
 U_K FAIBLEMENT NEGATIVES

- (étude par la méthode électrique)
- $U_L = 6750$ V
- $U_A = 6600$ V
- gaz : 1 atm. argon méthane
- source : ^{109}Cd
- $R_g = 1\text{ K}\Omega$
- polaroïd 47 - F/1,9 -
- 5 mV / carreau
- 100 ns / carreau

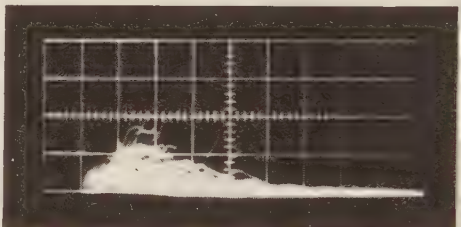
1 -

 $U_K = -400$ V

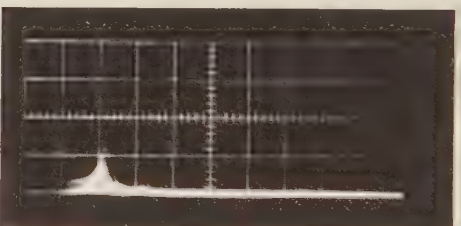
2 -

 $U_K = -75$ V

3 -

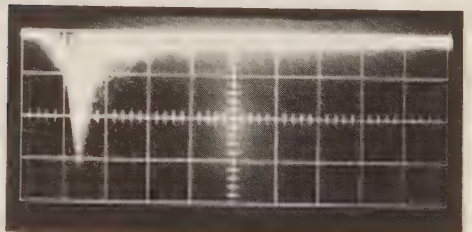
 $U_K = -50$ V

4 -

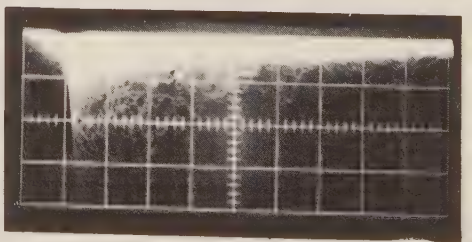
 $U_K = -25$ VB. AVALANCHES SANS ETINCELLES :
(TENSION U_A FAIBLE)

- (étude par la méthode optique)
- $U_L = 6700$ V
- $U_A = 6450$ V
- PM 56 AVP (THT = 1600 V)
($R_A = 100\Omega$)
- gaz : 1 atm. argon méthane
- source : ^{109}Cd
- polaroïd 47 - F/1,9
- 100 ns / carreau
- 10 mV / carreau (photo : 5)
- 5 mV / carreau (photo : 6)

5 -

 $U_K = -300$ V

6 -

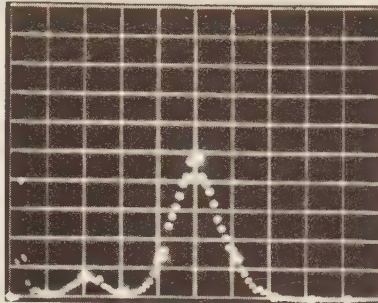
 $U_K = -50$ V

PL 33 INFLUENCE DE LA TENSION U_K SUR LES SPECTRES DES NOMBRES D'ÉLECTRONS DONNÉS PAR LES AVALANCHES

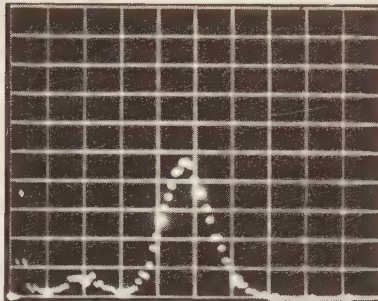
SPECTRES DU NOMBRE D'ÉLECTRONS, PAR AVALANCHE, SUR LA GRILLE :

- gaz : 1 atm. argon méthane
- spectres 1 à 5 :
gaz neuf
(mesures effectuées le jour de remplissage de la chambre)
- spectres 6 à 10 :
gaz en partie dégradé
(mesures effectuées 15 jours après le remplissage)
- résultats en étincelles : PL 49
- source : ^{55}Fe
- $U_L = 6700 \text{ V}$
- $U_d = 6550 \text{ V}$ (avec $U_K = -75 \text{ V}$)
- $U_A = 6475 \text{ V}$
(pour les spectres 1 à 5)
- $U_A = 6500 \text{ V}$
(pour les spectres 6 à 10)
- le 100° canal correspond à :
 $4 \cdot 10^6$ électrons

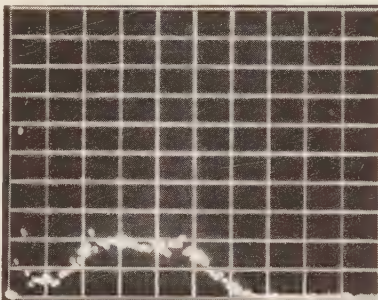
GAZ NEUF
1 $U_K = -300 \text{ V}$



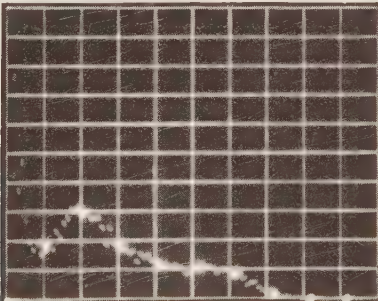
2 $U_K = -200 \text{ V}$



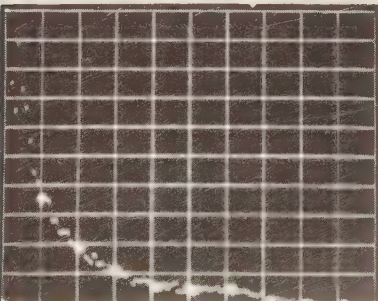
3 $U_K = -100 \text{ V}$



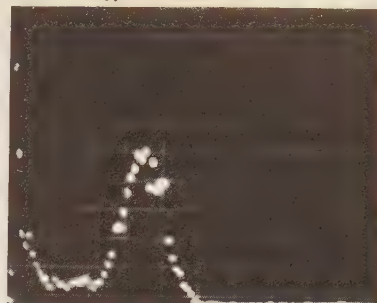
4 $U_K = -75 \text{ V}$



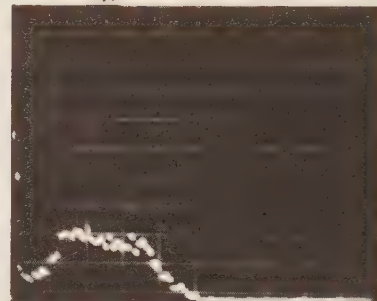
5 $U_K = -50 \text{ V}$



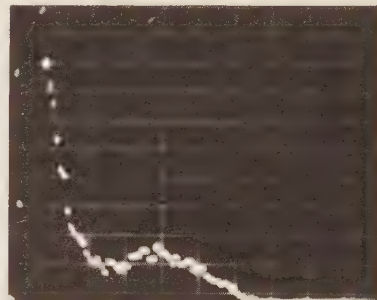
GAZ DEGRADE
6 $U_K = -400 \text{ V}$



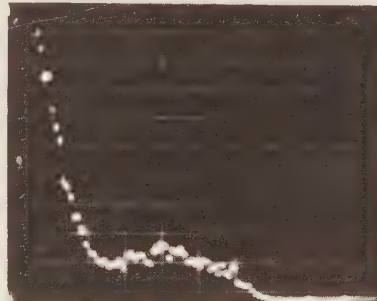
7 $U_K = -150 \text{ V}$



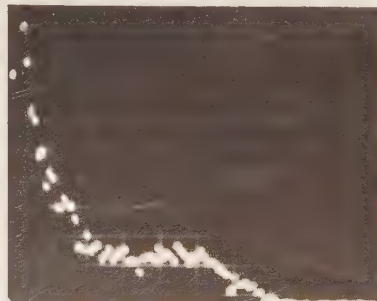
8 $U_K = -100 \text{ V}$



9 $U_K = -75 \text{ V}$

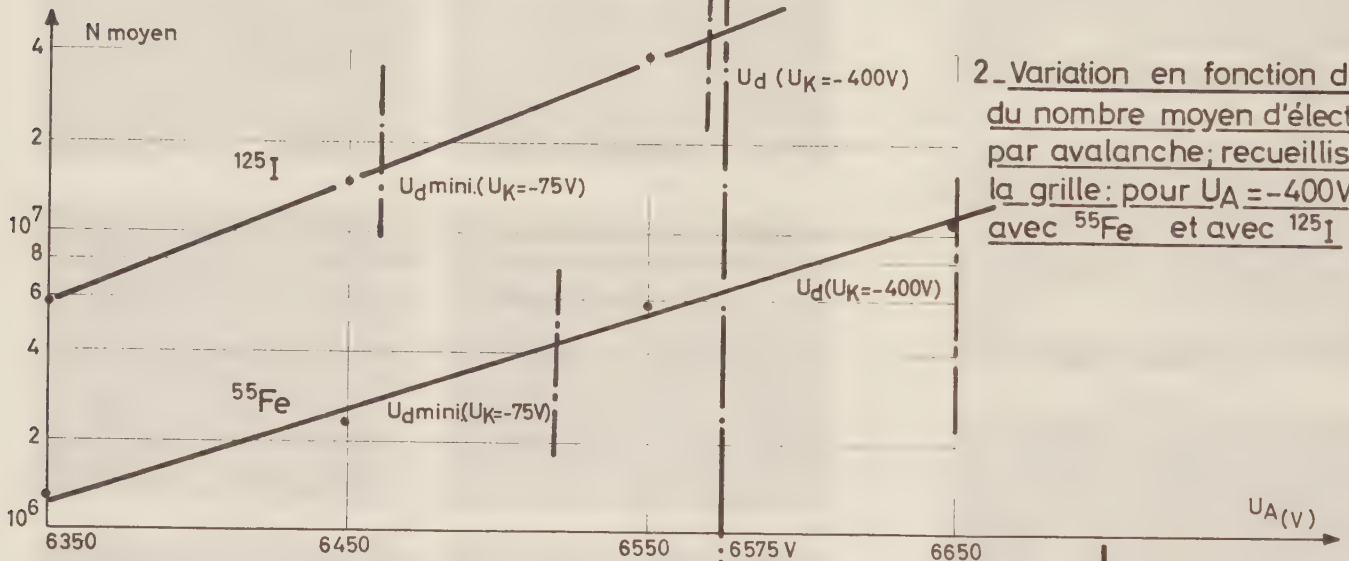
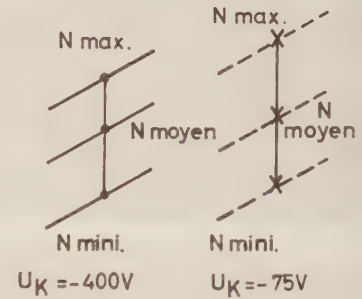
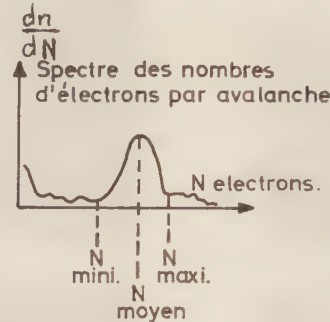
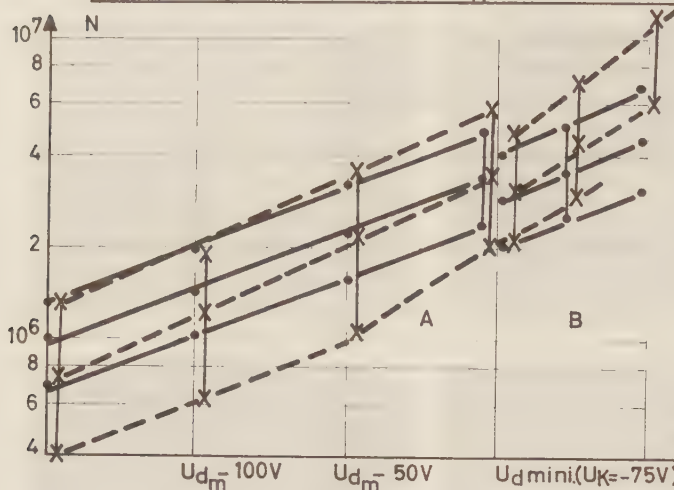


10 $U_K = -50 \text{ V}$

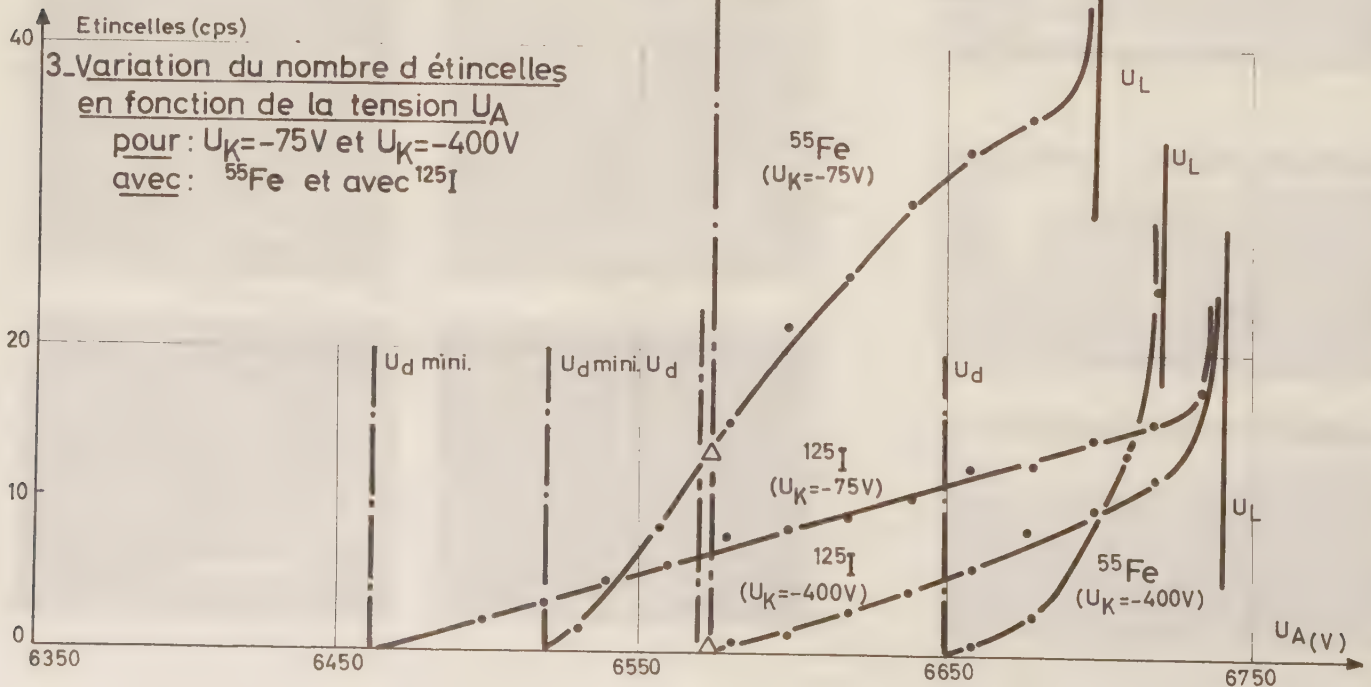


PL: 34 VARIATION DU NOMBRE D'ÉLECTRONS DONNES PAR LES AVALANCHES EN FONCTION DE LA TENSION U_A .
pour différentes valeurs de U_K et pour différentes sources

1- Variation, en fonction de U_A du nombre d'électrons par avalanche recueillis sur la grille, pour 2 valeurs de U_K : $U_K = -75V$ et $U_K = -400V$



2- Variation en fonction de U_A du nombre moyen d'électrons par avalanche; recueillis sur la grille: pour $U_A = -400V$ avec ^{55}Fe et avec ^{125}I



b) Variation de la durée des signaux d'avalanches en fonction de la tension U_K :

L'étude de cette variation est faite en mesurant la durée des impulsions données par un photomultiplicateur regardant les avalanches suivant la méthode donnée précédemment IV-1-c). La durée de l'impulsion la plus courte (t) n'est pas égale à celle du développement de l'avalanche c'est-à-dire au temps de transit (T) d'un électron à travers l'espace étincelle. Ce dernier peut être évalué en mesurant le temps séparant deux avalanches secondaires successives; il est de 100 à 120 ns. L'impulsion observée commence lorsque l'avalanche devient assez importante pour être décelée, elle est maximale lorsque l'avalanche atteint l'anode. Si 2 avalanches sont séparées par un temps E assez petit pour qu'elles donnent un seul signal, l'augmentation de la durée de l'impulsion est égale à E . La variation de la durée de ces impulsions donne donc l'étalement dans le temps (E) des avalanches individuelles dues à un même effet ionisant (le temps de formation de chaque avalanche individuelle restant constant) (voir Pl. 35-1).

La planche (35-2) donne, en fonction de la tension U_K , les variations de la forme du spectre des durées des impulsions obtenues dans des mêmes conditions avec des X de 6 keV. Lorsque la tension U_K est très négative, le spectre donne une courbe en cloche comprise entre 60 et 100 ns environ. Lorsque la tension U_K devient plus faible que - 200 V, le spectre s'élargit et les durées maximales augmentent rapidement; elles atteignent environ 200 ns quand $U_K = - 50$ V. La durée minimale des impulsions varie peu.

Les impulsions qui ont la durée minimale correspondent certainement à des avalanches formées par des électrons primaires créés près de la grille car ces électrons ne subissent pas de dispersion dans l'espace détection; il est normal que la durée de ces impulsions ne change pas quand la tension U_K varie. Les impulsions qui ont la durée maximale correspondent certainement à des avalanches formées par des électrons créés près de la cathode car ces électrons subissent la plus grande dispersion. La différence entre les durées des impulsions extrêmes correspond en 1^{re} approximation à l'étalement, dans le temps, de l'arrivée sur la grille des électrons créés à la cathode par un même effet ionisant. Cet étalement est de l'ordre de 40 ns quand la tension U_K est très négative, il commence à augmenter quand $U_K \neq - 200$ V et il est supérieur à 100 ns quand $U_K = - 50$ V.

La fluctuation du temps de formation de l'avalanche a été négligée, elle doit être assez faible (10 à 20 ns), surtout elle doit rester constante quand U_K varie.

c) Origine de la dispersion des électrons dans l'espace détection :

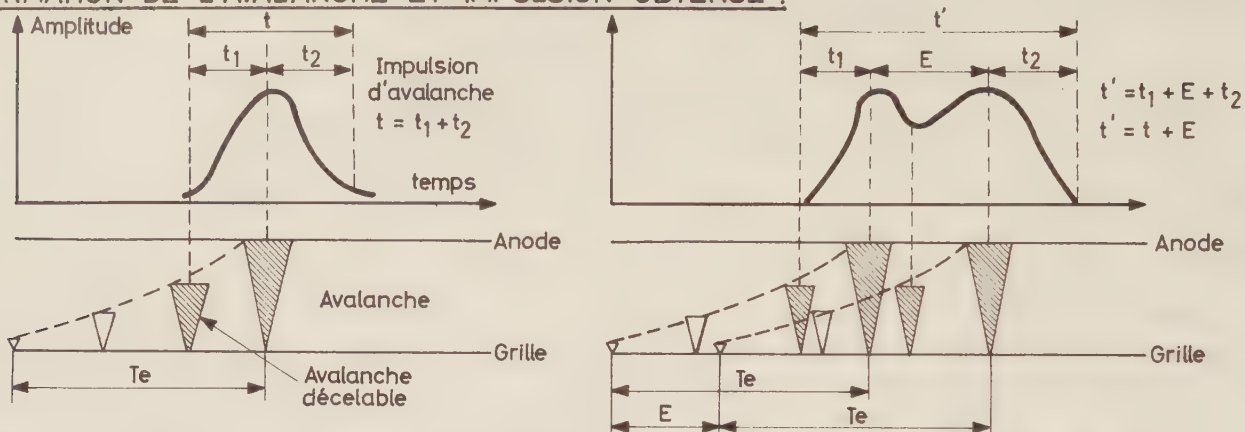
Cette étude est faite en mesurant la vitesse de dérive, dans l'espace détection, des électrons primaires créés par une particule α (α de 5,5 Mev de ^{241}Am) dans une trace parallèle aux électrodes. Si la distance de la trace à la grille est d et si le temps de montée de l'impulsion obtenue est t , la vitesse de dérive des électrons est $v = \frac{d}{t}$ (voir Pl. 35 bis 1.). La comparaison des amplitudes des impulsions obtenues dans différentes conditions avec l'amplitude maximale permet de connaître aussi la perte des électrons dans l'espace détection, par attachement ou recombinaison.

La courbe (Pl. 35 bis-3) montre les variations de la vitesse de dérive en fonction de la tension U_K . Cette vitesse est de l'ordre de 6 cm/ μ s pour les tensions U_K importantes, elle décroît rapidement quand U_K devient inférieure à 200 V et tend vers 0 en même temps que U_K . Dans les conditions optimales de fonctionnement en étincelles, elle est de l'ordre de 1 cm/ μ s; cela correspondrait pour les avalanches ayant l'étalement le plus long (de l'ordre de 100 ns) à un diamètre de diffusion de l'ordre du millimètre. La longueur de la trace primaire donnée par un X de 6 keV (qui produit un β de 3 keV) peut être évaluée à 0,2 mm environ ([29] page 624) et ne paraît pas responsable de l'étalement mesuré.

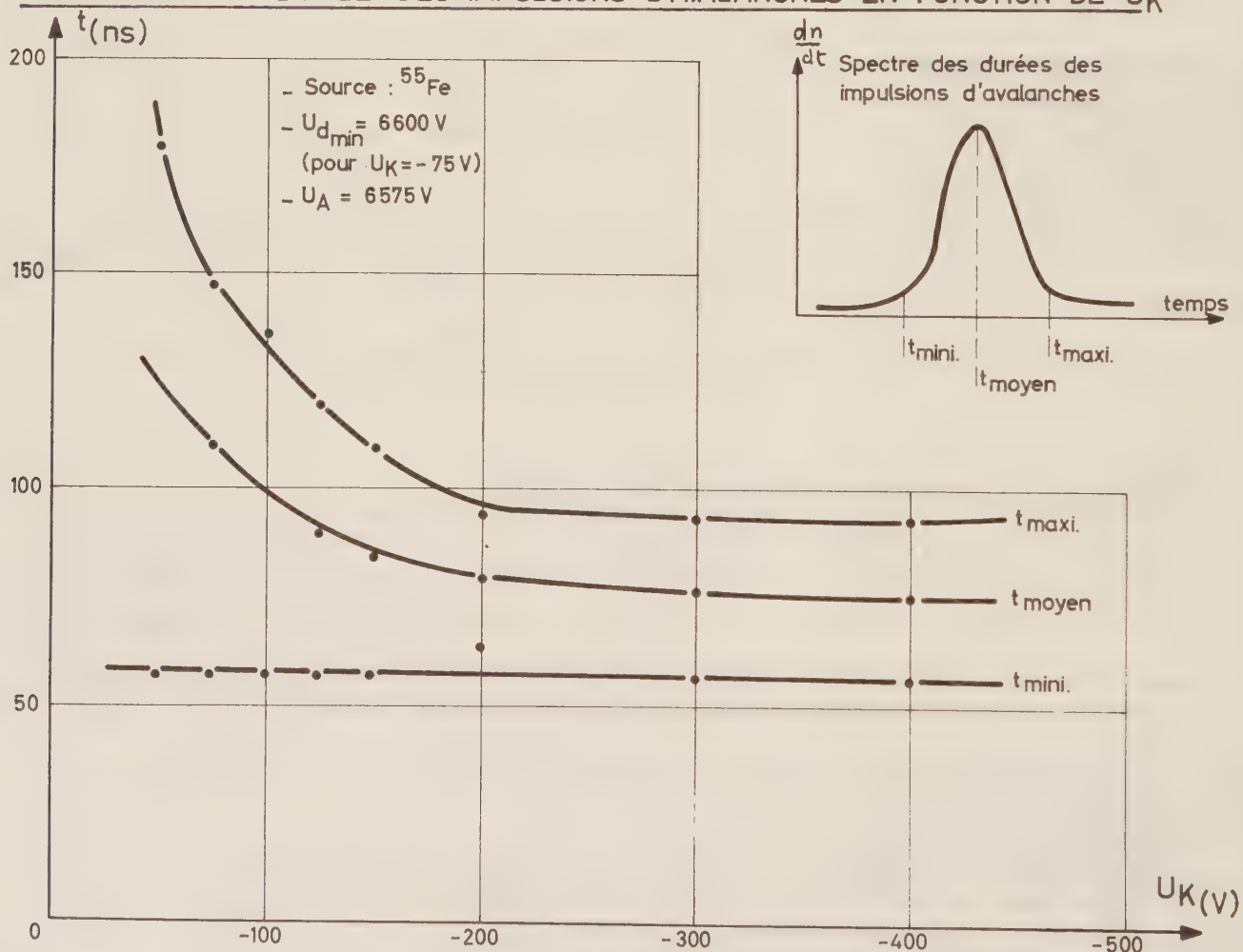
La courbe (Pl. 35-bis-2) montre que la collection des électrons reste constante quand la tension

PL: 35 VARIATION DE LA DUREE DES IMPULSIONS D'AVALANCHES EN FONCTION DE U_K

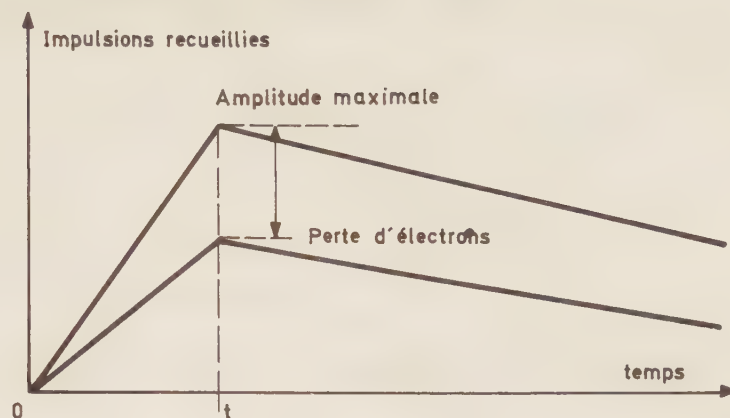
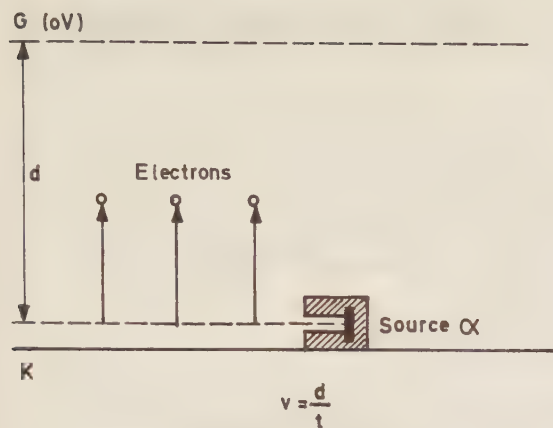
1. FORMATION DE L'AVALANCHE ET IMPULSION OBTENUE :



2. VARIATION DE LA DUREE DES IMPULSIONS D'AVALANCHES EN FONCTION DE U_K



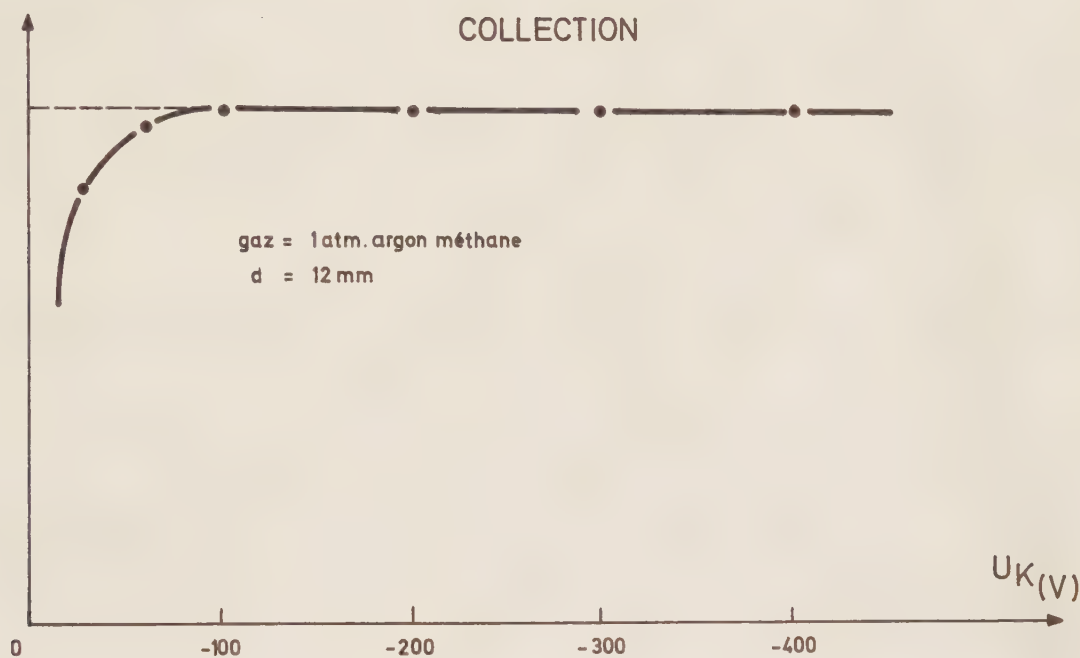
1_



2_

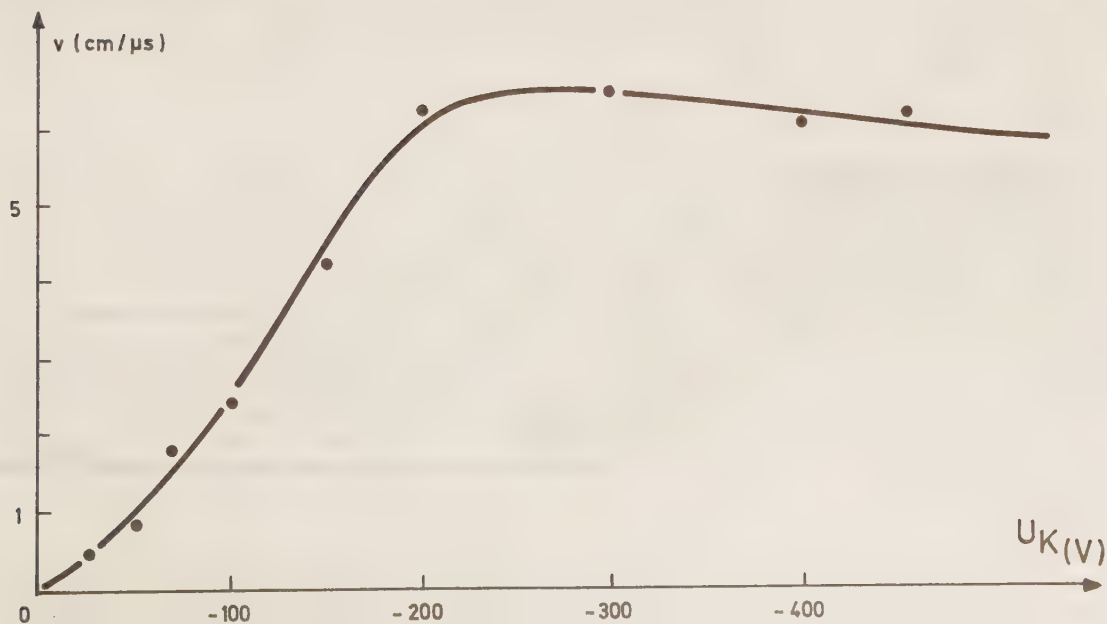
Nombre
maximal
collecté

COLLECTION

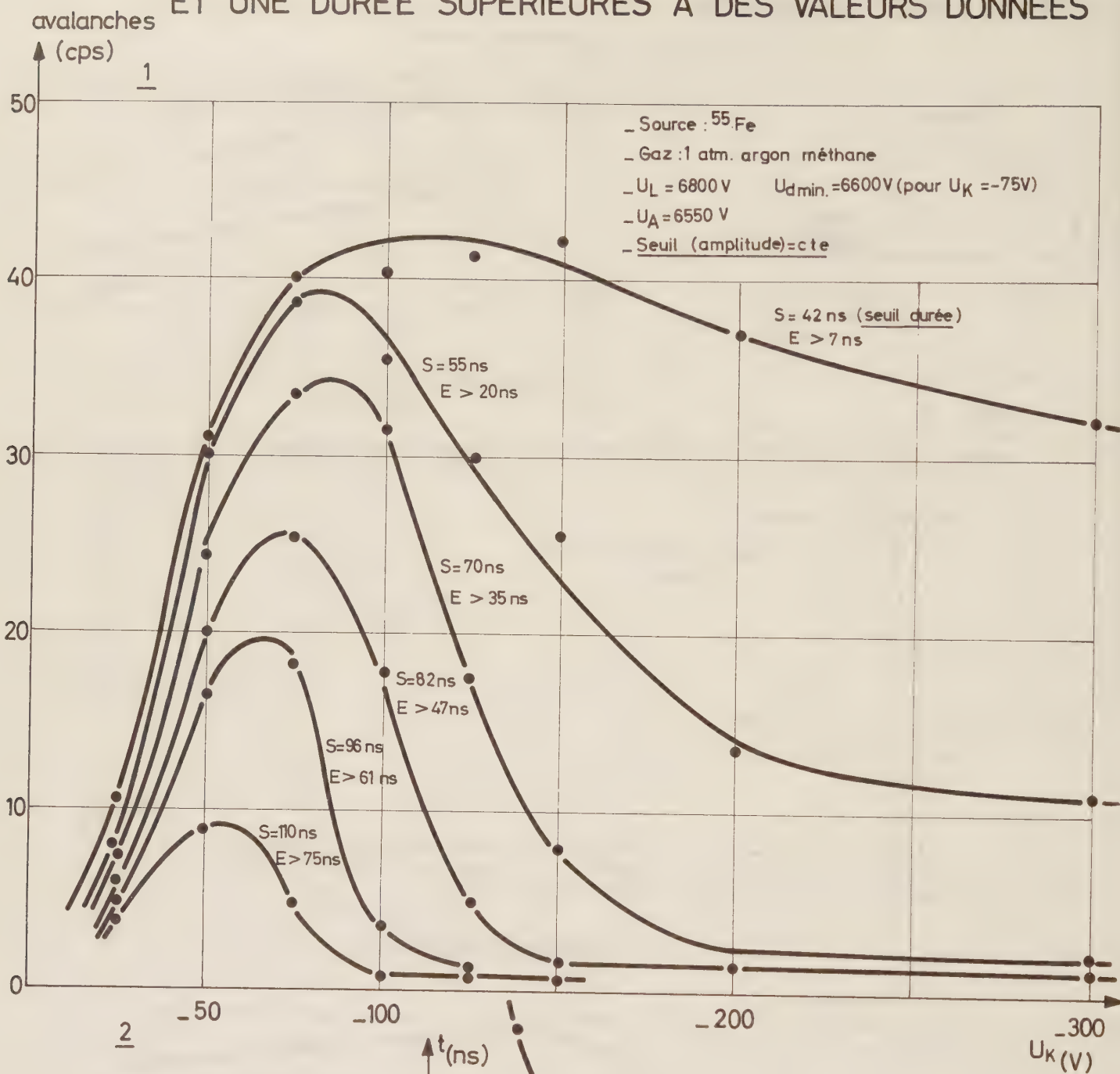


3_

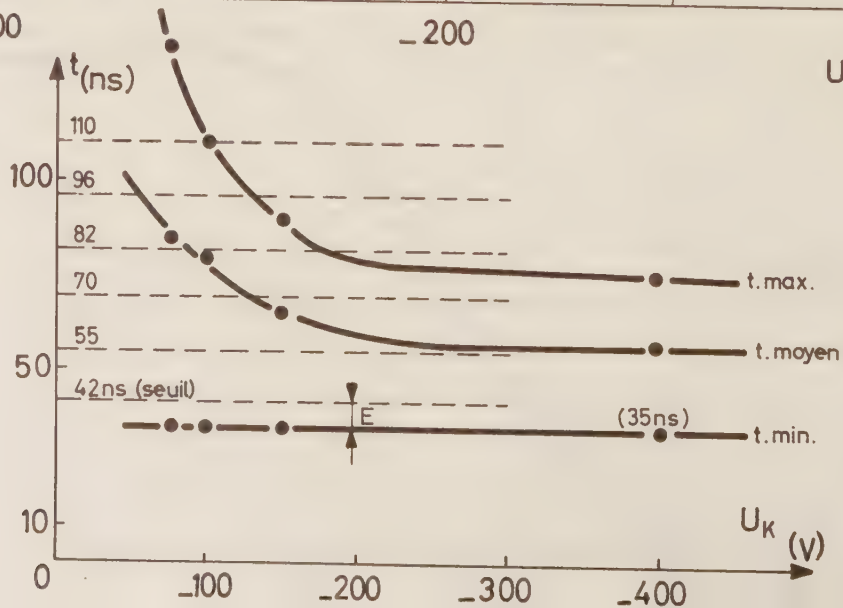
VITESSE DE DERIVE



PL:36 VARIATION, EN FONCTION DE LA TENSION U_K , DU NOMBRE D'IMPULSIONS D'AVANCHES AYANT UNE AMPLITUDE ET UNE DUREE SUPERIEURES A DES VALEURS DONNEES



Détermination de l'étalement (E) d'une avalanche correspondant à un seuil de durée donnée d'après la courbe de la durée des impulsions d'avalanches



U_K varie sauf pour les valeurs de U_K inférieures à 50 V pour lesquelles le nombre d'électrons collectés décroît rapidement.

Les deux courbes décrites ci-dessus expliquent la variation de la forme des impulsions d'avalanches quand la tension U_K décroît, lesquelles s'élargissent puis diminuent fortement quand U_K devient très faible. Elles pourraient aussi expliquer la forme de la courbe donnant la variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_K si la formation de l'étincelle était, d'une part, favorisée par un étalement de l'avalanche et d'autre part défavorisée quand le nombre d'électrons décroît. Pour vérifier ce point, nous avons déterminé, en fonction de U_K , la variation du nombre d'avalanches qui ont en même temps un nombre d'électrons et une durée supérieurs à des valeurs données.

d) Variation, en fonction de U_K , du nombre d'avalanches ayant, à la fois, un nombre d'électrons et une durée supérieurs à des seuils donnés :

Méthode de mesure :

Un "cathode follower" muni d'une grande résistance de grille donne des impulsions d'amplitude proportionnelle au nombre d'électrons contenus dans les avalanches. Simultanément un ensemble composé d'un photomultiplicateur suivi d'un convertisseur temps-amplitude fournit des impulsions d'amplitude proportionnelle à la durée des signaux d'avalanches. Les deux groupes d'impulsions, après discrimination, sont envoyés en coïncidence : il se produit une impulsion de coïncidence pour chaque avalanche ayant, à la fois, une durée et un nombre d'électrons supérieurs aux valeurs des seuils de référence.

Dans cet essai, les spectres de répartition du nombre d'électrons dans les avalanches restent à peu près semblables quand U_K varie de - 400 V à - 75 V. Le seuil correspondant au nombre d'électrons est pris égal au nombre minimal d'électrons donné par ces spectres.

Plusieurs valeurs de seuil sont prises pour la durée des impulsions d'avalanches. Pour chaque seuil, il est possible de déterminer l'ordre de grandeur de l'étalement des avalanches individuelles grâce à la courbe donnant la variation des durées des impulsions d'avalanches en fonction de la tension U_K ; cette courbe étant faite dans les mêmes conditions et avec le même gaz que les autres mesures (Pl. 36-2). L'étalement correspondant à un seuil donné est égal à la différence entre la durée correspondant au seuil et la durée minimale des impulsions qui correspond à un étalement nul.

Résultats :

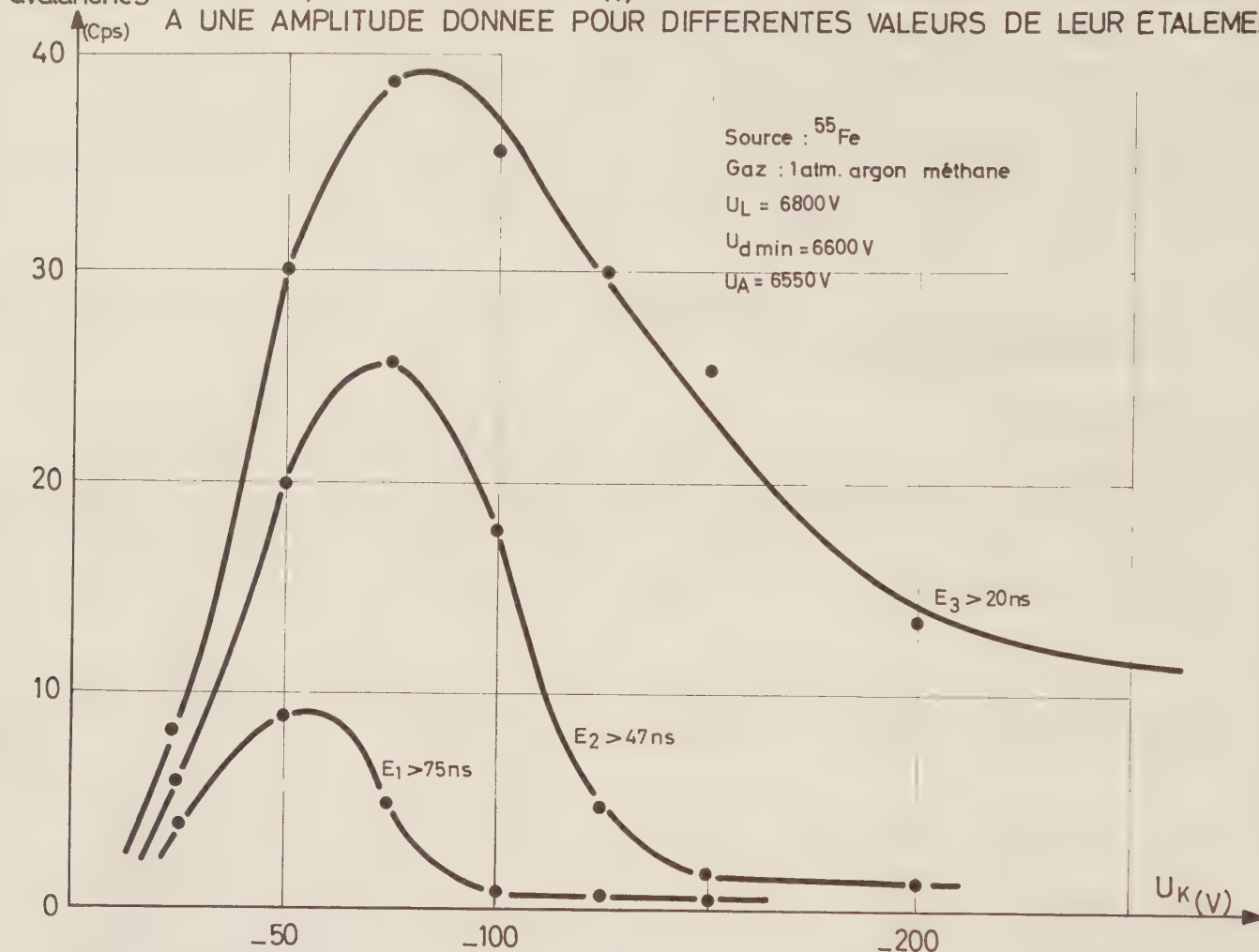
Les avalanches dont l'étalement est assez grand (> 40 ns) donnent une courbe de comptage en fonction de la tension U_K en forme de cloche assez étroite comprise entre - 200 V ou - 100 V et zéro. L'amplitude et la largeur de cette courbe sont d'autant plus réduites que le seuil correspond à un étalement plus grand. Quand le seuil d'étalement des avalanches est assez petit, la décroissance de la courbe est de plus en plus faible, vers les valeurs négatives de la tension U_K (Pl. 36-1).

La forme de ces courbes peut s'expliquer de la façon suivante :

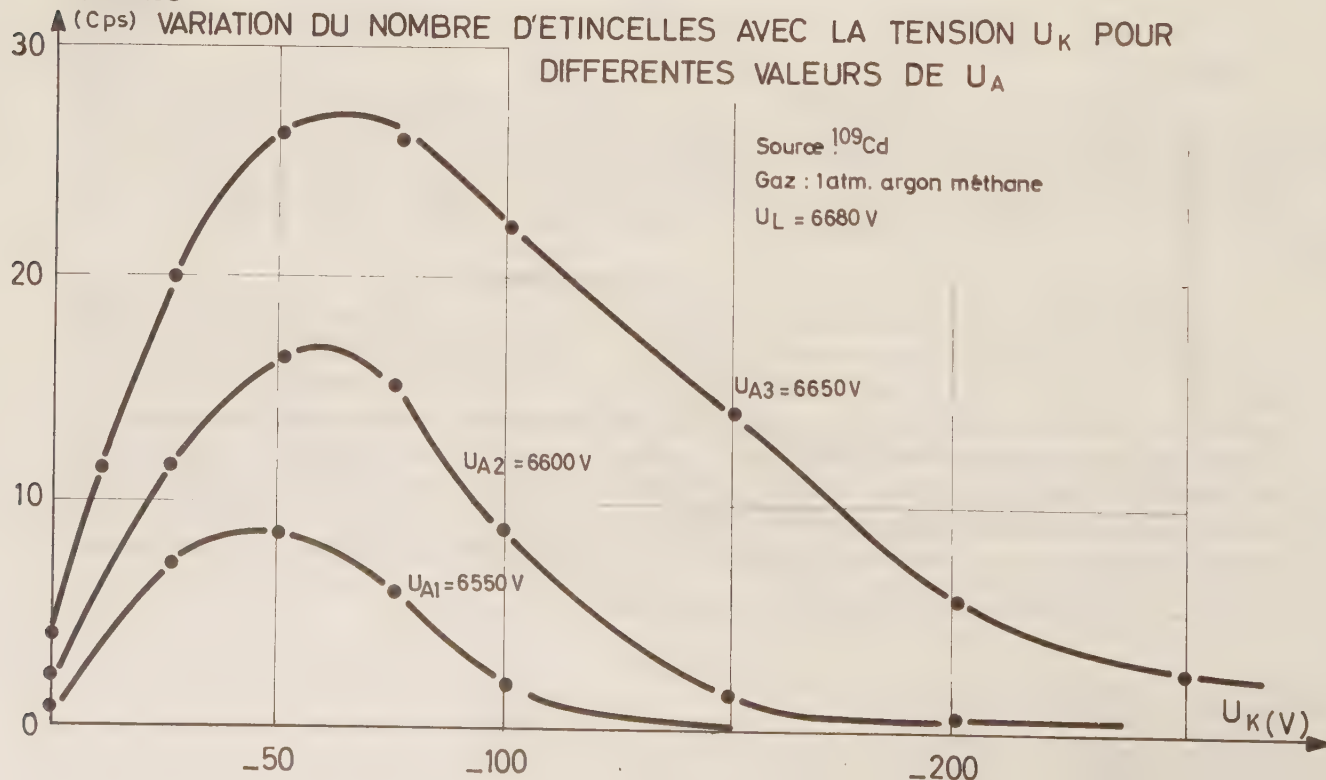
La décroissance vers les valeurs de U_K tendant vers 0 est due au seuil d'amplitude. La décroissance vers les valeurs négatives de U_K est due au seuil de durée (voir Pl. 36-2). Si ce seuil est supérieur à la durée maximale des impulsions obtenues avec les valeurs très négatives de U_K , les avalanches cessent d'être comptées lorsque la droite représentant le seuil passe au-dessus de la courbe des durées maximales des impulsions. Si le seuil est un peu inférieur à la durée maximale pour les valeurs très négatives de U_K , quelques avalanches sont comptées dans cette région et leur nombre reste à peu près constant. Si le seuil est seulement un peu supérieur à la durée minimale des impulsions, la décroissance du nombre d'avalanches comptées est faible quand U_K devient très négative.

PL : 37 COMPARAISON ENTRE LES COURBES CARACTERISTIQUES OBTENUES AVEC LES ETINCELLES ET LES COURBES OBTENUES AVEC LES AVALANCHES

avallanches VARIATION, EN FONCTION DE U_K , DU NOMBRE D'AVALLANCHES SUPERIEURES A UNE AMPLITUDE DONNEE POUR DIFFERENTES VALEURS DE LEUR ÉTALEMENT



étincelles VARIATION DU NOMBRE D'ETINCELLES AVEC LA TENSION U_K POUR DIFFERENTES VALEURS DE U_A



On peut dire aussi :

Quand la tension U_K devient moins négative, la dispersion croît pour un groupe d'électrons créés en un point donné de l'espace de détection; ou encore, une dispersion donnée est obtenue pour des groupes d'électrons créés de plus en plus loin de la cathode, c'est-à-dire dans un volume de détection de plus en plus grand. Le nombre d'avalanches correspondantes croît donc quand la tension U_K devient moins négative; il redécroît quand la tension U_K tend vers zéro et que le nombre d'électrons contenus dans les avalanches devient inférieur au seuil fixé.

3- Interprétation des courbes caractéristiques de variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_K , à l'aide de l'étude des avalanches.

Comparons les deux réseaux de courbes (Pl. 37). Le 2^o réseau donne, pour plusieurs valeurs de la tension U_A , la variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_K . Le 1^o réseau donne, pour plusieurs valeurs de l'étalement des avalanches, le nombre d'avalanches dépassant un seuil donné à une tension U_A donnée, en fonction de la tension U_K . La similitude entre la forme des courbes dans les deux réseaux est remarquable. Les courbes du nombre d'avalanches, lorsque le seuil d'étalement devient plus petit, varient comme les courbes du nombre d'étincelles quand la tension U_A croît.

Le déclenchement des étincelles paraît donc directement lié à l'étalement des avalanches. Si les avalanches ayant un étalement E_1 donnent des étincelles à une tension U_{A_1} avec un nombre d'électrons N_1 , les avalanches ayant un étalement E_2 plus petit ne donnent des étincelles qu'à une tension U_{A_2} ($U_{A_2} > U_{A_1}$), par conséquent aussi, qu'avec un nombre d'électrons N_2 ($N_2 > N_1$).

Conclusion :

Il semble donc que, si les avalanches individuelles correspondant à un même effet ionisant sont assez étalées, elles puissent donner une étincelle avec un nombre d'électrons plus petit et à une tension U_A plus faible.

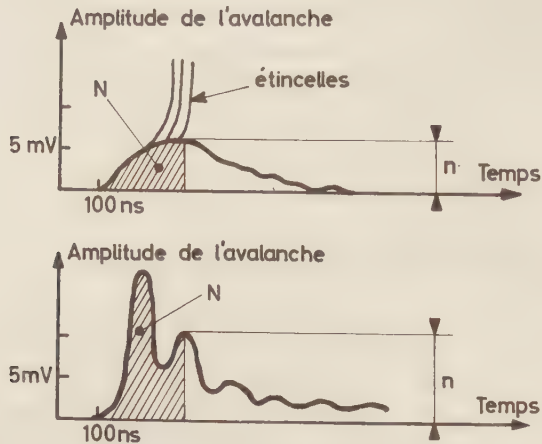
Avec un même nombre d'électrons primaires, la tension U_A nécessaire pour donner une étincelle varie de l'ordre de 100 V pour une tension de 6500 V (soit entre 1 et 2 %); le nombre d'électrons formés varie d'un rapport compris entre 2 et 3 (voir Pl. 34).

4- Remarques sur la formation des étincelles :

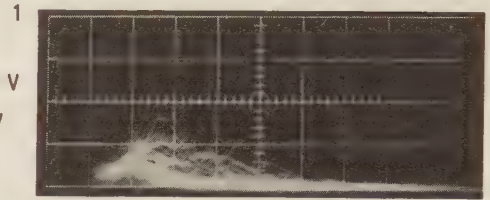
D'après la théorie du "streamer" (II-1.1-b), la formation de l'étincelle nécessite la présence d'un certain nombre critique d'électrons dans une avalanche. Mais ce nombre critique peut varier suivant les conditions expérimentales; la chambre à 3 électrodes met certaines de ces variations en évidence. La valeur U_d de la tension U_A à laquelle commencent les étincelles peut varier légèrement de quelques %; l'étincelle peut se former avec une haute tension un peu plus faible mais avec un nombre critique d'électrons plus important, obtenus à partir d'un nombre beaucoup plus grand d'électrons primaires. Ce phénomène avait été observé en comparant les étincelles formées par des α et par irradiation X ([5] page 137). La chambre à 3 électrodes permet de voir ce phénomène avec des X de différentes énergies. Elle permet surtout de voir qu'avec une même tension et un même nombre d'électrons primaires, l'étincelle se forme plus facilement si les électrons ont une certaine dispersion au lieu d'être groupés.

La dispersion que nous avons étudiée, qui correspond à un étalement dans le temps des divers avalanches individuelles, est perpendiculaire aux électrodes. Elle est provoquée certainement par une

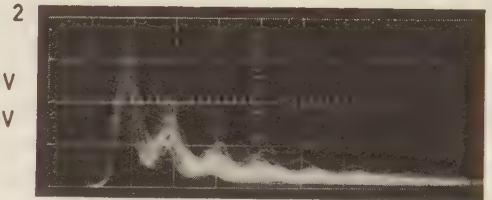
1. FORMATION DES ETINCELLES A PARTIR DES AVALANCHES



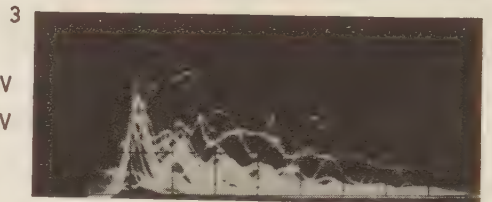
- (Etude par la méthode électrique)
- Gaz : 1atm. argon méthane
- Source ^{109}Cd
- $U_L = 6750 \text{ V}$
- $R_g = 1 \text{ K}\Omega$
- Polaroid 47 - f/1,9 (photos 1 et 2)
- 410 - f/1,9 (photos 3 à 6)
- 100 ns / carreau
- 5 mV / carreau (photos 1 et 2)
- 10 mV / carreau (photos 3 à 6)



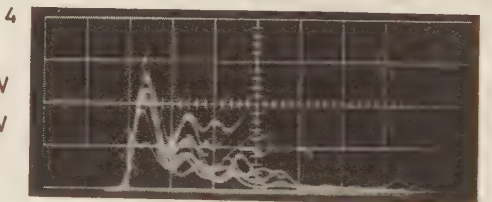
$U_A = 6600 \text{ V}$
 $U_K = -50 \text{ V}$



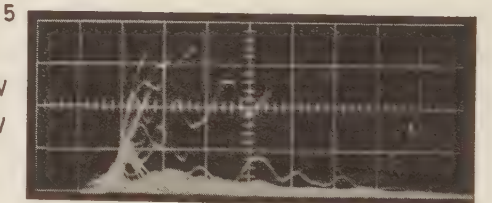
$U_A = 6700 \text{ V}$
 $U_K = -400 \text{ V}$



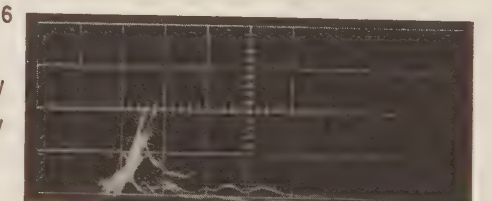
$U_A = 6700 \text{ V}$
 $U_K = -300 \text{ V}$



$U_A = 6700 \text{ V}$
 $U_K = -150 \text{ V}$



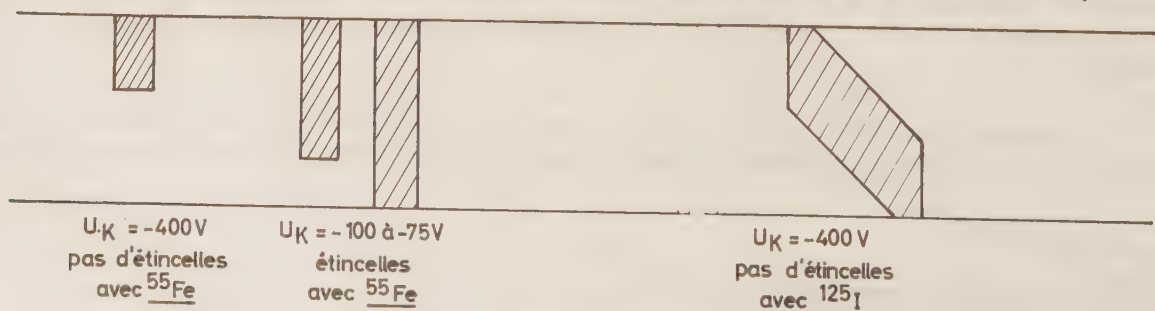
$U_A = 6700 \text{ V}$
 $U_K = -100 \text{ V}$



$U_A = 6700 \text{ V}$
 $U_K = -50 \text{ V}$

2. DISPERSION DES ELECTRONS ET FORMATION DE L'ETINCELLE :

(la dispersion est supposée être uniquement perpendiculaire aux électrodes)



diffusion sensiblement homogène qui se produit dans l'espace détection et qui fait de l'ordre de 1 mm de diamètre. Cette diffusion dans l'espace détection produit une dispersion des électrons dans l'espace étincelles qui reste de grandeur analogue dans les directions parallèles aux électrodes, mais qui devient beaucoup plus grande dans la direction perpendiculaire aux électrodes à cause des différences de vitesse des électrons dans les 2 espaces. En effet une diffusion de 1 mm dans l'espace détection produit un temps total d'arrivée des divers électrons de 100 ns à la vitesse de 1 cm/ μ s; cela provoque dans l'espace étincelles, où la vitesse est de 5 mm/100 ns environ, une dispersion de l'ordre de 5 mm qui correspond à la longueur de l'espace étincelles. Nous pensons que la formation de l'étincelle est surtout favorisée par la dispersion des électrons dans la direction perpendiculaire aux électrodes.

Voyons par exemple comment est décrite la formation du "streamer" lorsque la surtension appliquée sur une chambre est assez importante. L'avalanche atteint le nombre critique d'électrons lorsqu'elle se trouve vers le milieu de l'espace interélectrodes, en un point A. Il se produit alors deux transformations successives :

- a)- Une partie des électrons est retenue près de A par la charge d'espace créée par les ions.
 - Une partie dérive vers l'anode à une vitesse plus grande que la vitesse normale. Cela peut être dû à un effet d'ionisation dans le gaz ou à une répulsion créée par le grand nombre d'électrons qui provoque une importante augmentation de la diffusion. (d'après RAETHER[5] pages 83 et 127).
 - Dans cette première phase le coefficient de multiplication des électrons est inférieur à α et le principal phénomène qui se produit est une dispersion des électrons dans un canal allant de A vers l'anode.
- b)- Il se produit ensuite un canal d'électrons avançant très rapidement de A vers la cathode avec un coefficient de multiplication des électrons supérieur à α .

Ce canal est sans doute formé par des têtes d'avalanches secondaires qui deviennent importantes de plus en plus près de la cathode, car la multiplication est augmentée par le champ dû à la charge d'espace créée par les ions.

L'origine de ces avalanches secondaires pourrait être la photoionisation du gaz d'après RAETHER ([5] page 128).

D'après WARD qui a analysé avec un ordinateur les résultats expérimentaux de THOLL [30] ces avalanches pourraient être dues à des effets secondaires sur la cathode [31]. D'après WARD également, tous les autres phénomènes pourraient simplement être provoqués par les charges d'espace créées par les électrons et les ions sans qu'il y ait ionisation du gaz [31].

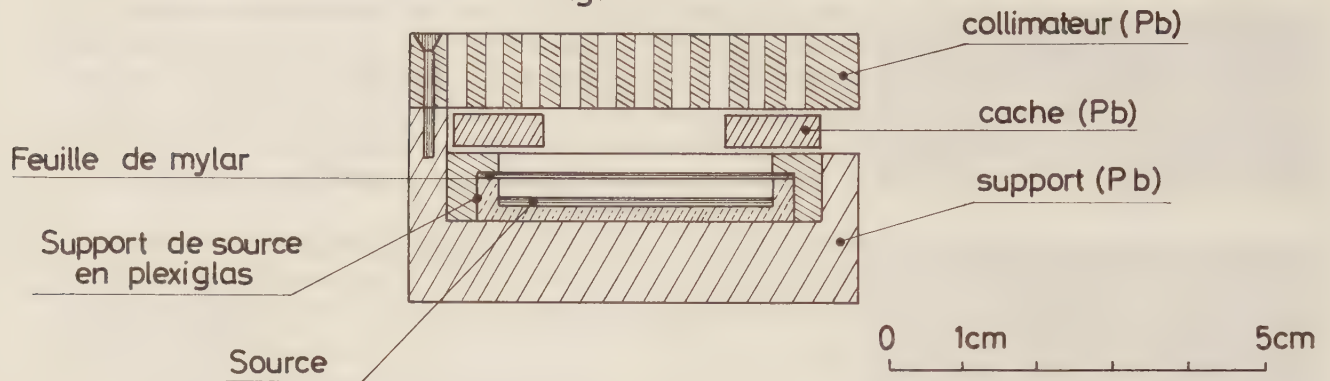
Il y a donc, dans cette phase, un renforcement de la multiplication par l'effet des ions et un effet de dispersion des électrons dans un canal dirigé de A vers la cathode et formé par des avalanches secondaires successives qui se suivent.

Lorsque la tension est égale à la tension de décharge avec l'argon méthane à une atmosphère, l'avalanche primaire n'atteint pas l'amplification critique. Elle est suivie de quelques avalanches secondaires séparées par un intervalle de 100 ns environ et dont l'amplitude va en décroissant. L'étincelle se forme sur une avalanche secondaire; elle se forme donc à partir d'un nombre d'électrons plus faible et elle est certainement favorisée par les avalanches précédentes. La charge d'espace créée par les ions qui sont restés doit en effet avoir un rôle favorable.

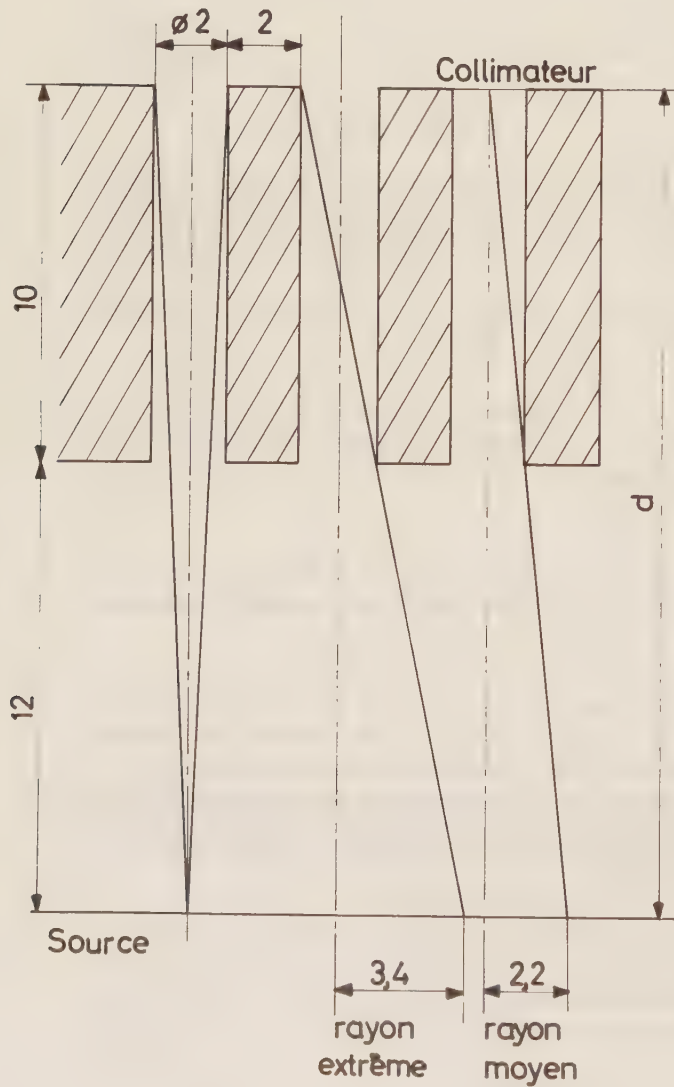
Le même phénomène peut se produire pour les avalanches (sans effets secondaires, à une tension U_A plus faible) qui sont étalées par l'action de l'espace détection. Les électrons qui arrivent les derniers subissent l'influence des ions des avalanches individuelles précédentes. Mais l'action des ions n'est peut être pas le seul phénomène qui intervient. En effet, la formation de l'étincelle serait fonction

1_ Ensemble collimateur et source

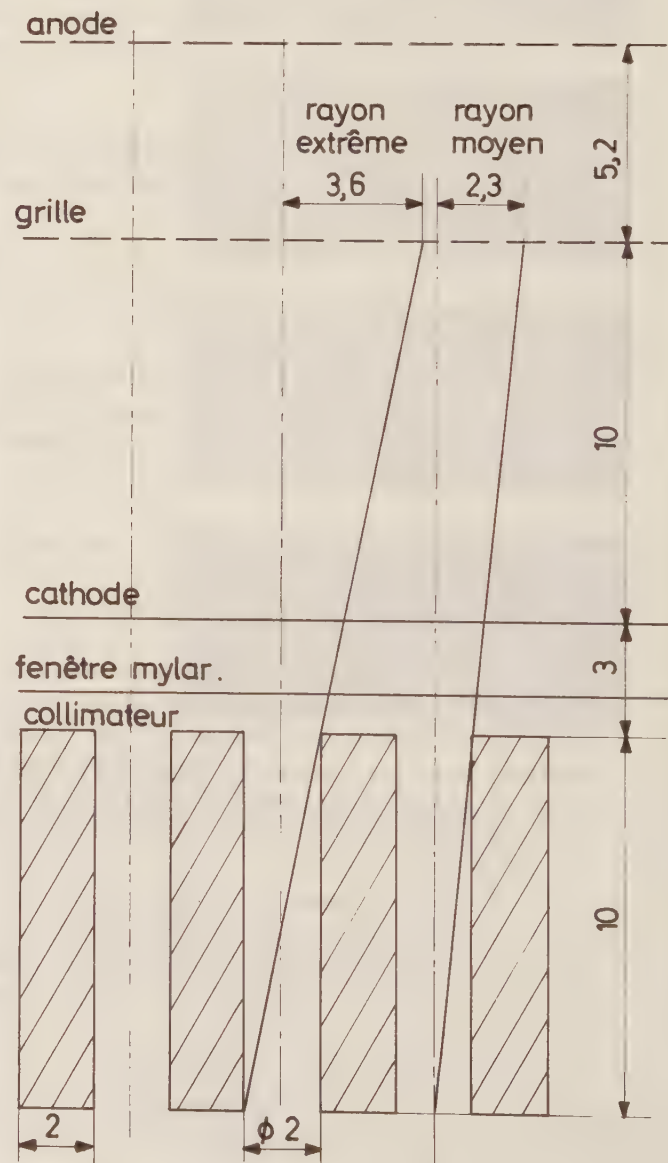
Fig:1



2_ Géométrie donnée par l'ensemble collimateur + source dans les essais de rendement. (montage ci-dessus)



3_ Géométrie donnée par l'ensemble collimateur + chambre dans les essais de définition. (chambre de ϕ utile 160mm)



du nombre d'électrons présents et du nombre d'ions formés par les avalanches déjà collectées. Et, bien que les impulsions obtenues ne donnent qu'une idée grossière des phénomènes, il semble que l'étincelle se forme dans le cas des avalanches étalées avec des nombres n d'électrons et N d'ions plus faibles que dans le cas d'avalanches secondaires (voir Pl. 38-1). La différence entre les 2 cas est que dans le premier les électrons sont répartis sur une longueur appréciable de l'espace étincelles au lieu d'être plus groupés comme dans le deuxième.

On peut se demander si la présence d'un certain nombre d'électrons sur une assez grande longueur de "l'espace étincelles" ne diminue pas la rigidité diélectrique du gaz et ne favorise pas ainsi la formation de l'étincelle. Nous avons vu que cette dispersion a lieu dans la formation normale du streamer. Il est possible qu'elle se produise aussi avec les avalanches secondaires après 3 ou 4 générations car chaque émission secondaire de la cathode a lieu pendant un certain temps de l'avalanche précédente. Dans ce cas, l'étalement de l'avalanche primaire devrait diminuer le retard de formation de l'étincelle; c'est ce qui se produit effectivement (Pl. 38-1).

Cette hypothèse, cependant, semblerait infirmée par les résultats obtenus avec les X de 27 keV de l'iode 125 qui donnent des traces primaires de 7 mm environ dans l'argon méthane à une atmosphère. L'étalement des avalanches est supérieur à 100 ns, même pour les tensions très négatives de U_K et cependant même avec ce rayonnement il n'y a pas d'étincelles pour ces tensions importantes de U_K . Seulement, avec ce rayonnement, la trace assez longue est oblique par rapport à la direction du rayonnement X qui est perpendiculaire aux électrodes (à cause du collimateur) (voir [29] p.696). Dans ce cas particulier il est donc possible que les électrons arrivant les derniers ne soient pas influencés par les événements antérieurs qui se sont passés en un autre point de la chambre (voir Pl. 38-2).

Conclusion

Cette étude a montré que la formation de l'étincelle, dans le montage étudié avec de l'argon méthane, est liée à la dispersion des électrons dans l'avalanche et qu'elle est facilitée par une certaine dispersion. Il est probable que la dispersion perpendiculaire aux électrodes soit responsable de ce phénomène. Les électrons qui arrivent les derniers sont soumis à un champ plus grand à cause des ions déjà formés et il est possible que la présence d'un certain nombre d'électrons sur une partie importante de la distance entre les électrodes favorise l'étincelle.

3.- RESULTATS DONNES PAR LA CHAMBRE AVEC DES RAYONNEMENTS D'ENERGIES ET D'INTENSITES DIVERSES

a) Description des sources utilisées :

Montage : (Pl. 39-1)

Pour des raisons pratiques, les sources employées sont, en général, enfermées dans de petits containers de plomb. La partie supérieure forme une grille collimatrice; elle a 10 mm d'épaisseur et elle est percée de trous de ϕ 2 mm distants de 4 mm entre centres. La source déposée sur un cercle (ϕ 36 mm) de papier buvard est à l'intérieur d'un support de plexiglas. Entre la grille et le support de source se place un cache de plomb (épaisseur 5 mm) percé d'un trou de la forme désirée.

Sources : Divers radioéléments sont utilisés :

^{55}Fe	(énergie principales : 6 keV	période : 2,6 ans)
^{109}Cd	22 keV	470 jours
^{125}I	27 keV	60 jours
^{197}Hg	70 keV	65 heures
^{141}Ce	145 keV	33 jours
^{51}Cr	320 keV	28 jours

PL:40 SPECTRE DES SOURCES UTILISEES POUR L'ETUDE DE LA CHAMBRE

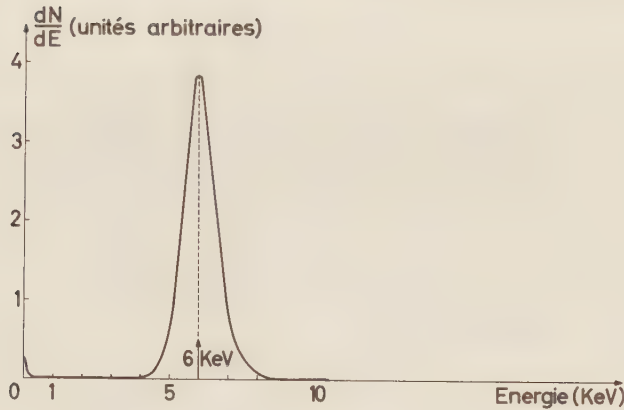
Sources étudiées avec un compteur proportionnel

- _Gaz : 1atm. Xénon (90%) Méthane (10%)
- _Fenêtre : 1mm Béryllium
- _Les sources étudiées sont placées dans le support (Pb) avec le collimateur

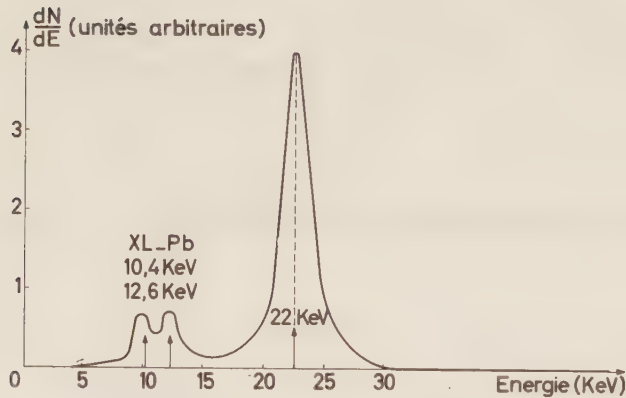
Sources étudiées avec un détecteur à scintillation

- _Détecteur : DC.S1
- _Cristal : NaI "Tl"
- $\phi = 3,75\text{cm}$ $h = 2,5\text{cm}$
- _Les sources étudiées sont placées dans le support (Pb) avec le collimateur

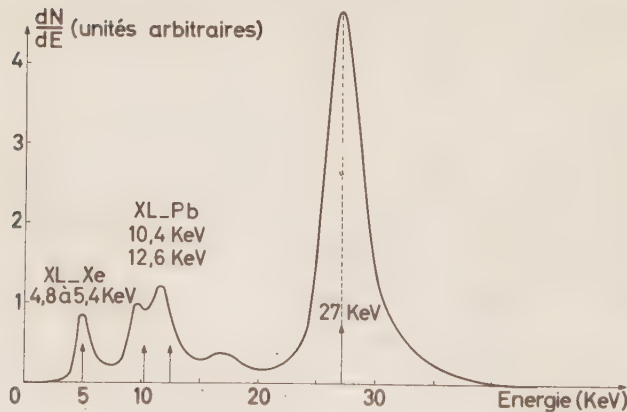
1) ^{55}Fe



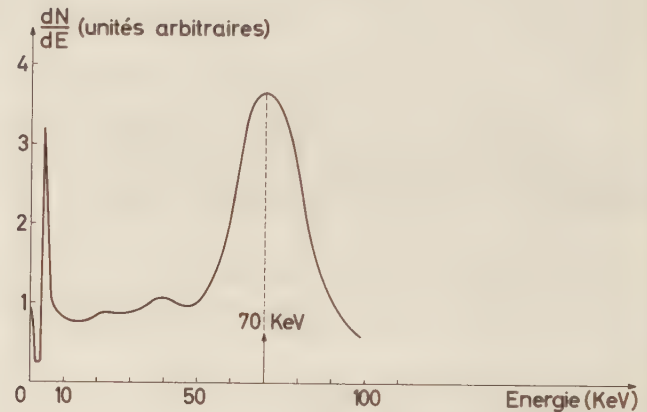
2) ^{109}Cd



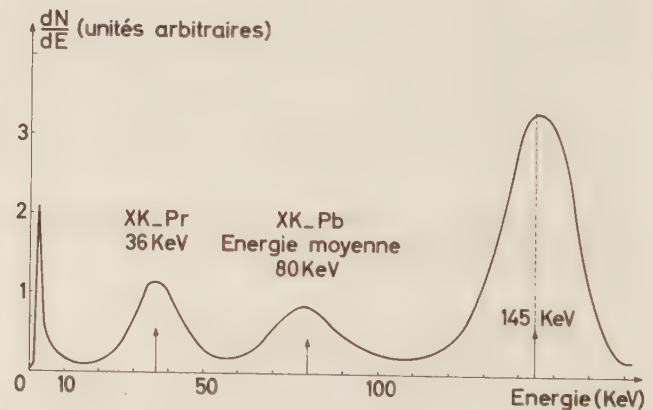
3) ^{125}I



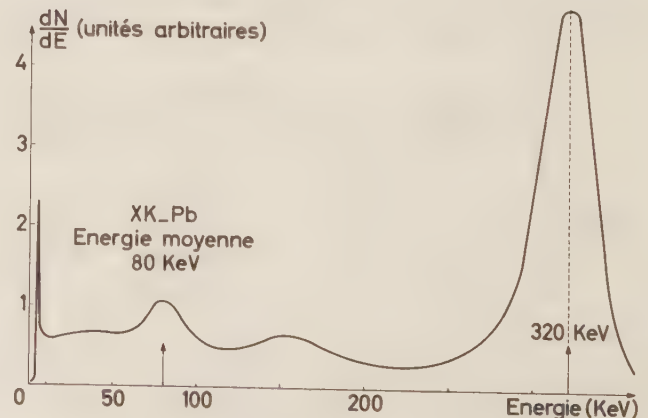
4) ^{197}Hg



5) ^{141}Ce



6) ^{51}Cr



Les rayonnements donnés par les sources de ^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{125}I sont étudiés avec un compteur proportionnel de grande surface [32] rempli de xénon méthane et muni d'une fenêtre de béryllium. Les rayonnements donnés par les sources de ^{197}Hg , ^{141}Ce , ^{51}Cr sont étudiés avec une sonde à scintillation (DCS1) équipée d'un cristal NaI (Tl) de diamètre 3,75 cm et de hauteur 2,5 cm.

Les spectres obtenus sont donnés (Pl. 40).

1- Etude du rendement de la chambre :

a) Définition

Le rendement de détection (R) de la chambre dépend :

- du rendement (r_1) donné par la géométrie de la grille collimatrice
- du rendement (r_2) de transmission de la paroi formant la cathode
- du rendement (R_1) de détection de la cathode
- du rendement (R_2) de détection dans le gaz de l'espace détecteur

$$R = r_1 \cdot r_2 \cdot R_1 \cdot R_2$$

Le rendement en étincelles dépend aussi des facteurs suivants :

η_1 = rapport du nombre d'avalanches détectables sur le nombre d'effets ionisants

η_2 = rapport du nombre d'étincelles sur le nombre d'avalanches détectables.

Le rendement de détection de l'espace étincelles est négligé car seule la partie située au voisinage immédiat de la grille peut donner des avalanches suffisantes pour provoquer une étincelle.

Le rendement est étudié seulement pour les X de faible énergie (^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{125}I) car pour les X plus énergiques, avec le gaz employé (argon méthane), le rendement se fait surtout par effet de paroi et est faible (de l'ordre de 10^{-3}). Le comptage des rayonnements est fait avec une sonde à scintillation munie d'un cristal de NaI (Tl) de diamètre 3 cm, d'épaisseur 5 mm, avec une paroi de 0,15 mm de béryllium.

b) Rendement donné par la géométrie de la grille collimatrice

Le rendement de la grille ne change pratiquement pas quand la distance de la source à la face inférieure de la grille varie de quelques millimètres à quelques centimètres.

Calcul : donnant l'ordre de grandeur du rendement :

Pour les points de la source voyant entièrement la partie supérieure d'un trou le rendement est : (voir Pl. 40-2).

$$r_1 = \frac{\text{surface du cercle de rayon } r}{\text{surface de la sphère de rayon } d}$$

$$r = 1 \text{ mm}$$

$$d = 22 \text{ mm} \quad \left\{ \begin{array}{l} r_1 = \frac{\pi r^2}{4 \pi d^2} \end{array} \right. \quad r_1 \text{ est de l'ordre de } 5 \cdot 10^{-4}$$

Une approximation classique est de considérer le champ moyen comme surface de la source donnant ce rendement pour chaque trou. Le champ moyen étant un cercle de rayon $2r$, on aboutit au résultat que tous les points de la source sont vus avec la même efficacité.

Mesure : Le comptage n_s donné par la source, placée à une distance d du cristal, (qui est vu de la source sous un angle solide Ω), permet de connaître le nombre N de rayonnements émis.

$$N = \frac{n_1}{\Omega} \quad (d = 66 \text{ cm}) \quad \Omega = \frac{\pi \cdot 1,5^2}{4 \cdot \pi \cdot 66^2} = 1,29 \cdot 10^{-4}$$

Le comptage n_2 donné par la même source, placée derrière la grille collimatrice, près du cristal, permet de déterminer le rendement r_1 donné par la grille.

$$r_1 = \frac{n_2}{N}$$

Le comptage considéré est celui donné par le pic principal des spectres et les sources (^{125}I) sont utilisées avec un cache donnant un trou de ϕ 20 mm pour que la 2^e mesure soit significative.

Source	n_1 cps	N cps	n_2 cps	r_1
1m Ci ^{125}I (du 2.10.65)	307	$238 \cdot 10^4$	1530	$6,45 \cdot 10^{-4}$
500 Ci "	197	$153 \cdot 10^4$	1000	6,55
250 Ci "	151	$117 \cdot 10^4$	810	6,9

$$r_1 = 6,5 \text{ à } 7 \cdot 10^{-4}$$

Remarque sur l'étalonnage et l'homogénéité des sources

Les comptages ci-dessus ne sont pas proportionnels à l'activité nominale des sources. Les mesures ci-dessous montrent que l'activité nominale est une valeur approchée et surtout que les sources ne sont pas homogènes sur toute leur surface, ce qui oblige à les tester et à les employer dans les mêmes conditions c'est-à-dire avec le même cache.

Les différences trouvées, entre le nombre de rayonnement réellement émis par une source et le nombre théorique calculé d'après la valeur nominale de la source peut atteindre 30 %.

La comparaison des comptages donnés par la même source placée, nue ou avec différents caches, à une distance (d), du cristal permet de tester l'homogénéité de cette source.

Source	n_1 cps sans cache ϕ 36 mm S_1	n_2 cps cache ϕ 30 mm S_2	n_3 cps cache ϕ 20 mm S_3	$\frac{n_2}{n_1}$ $\frac{S_2}{S_1} = 0,69$	$\frac{n_3}{n_1}$ $\frac{S_3}{S_1} = 0,31$
1 m Ci ^{125}I (22.10.65)	1500	792	307	0,53	0,20
500 μ Ci "	785	462	197	0,59	0,25
250 μ Ci "	384	267	151	0,69	0,39

c) Rendement de transmission de la paroi servant de cathode :

Pour les mesures de rendement faites avec les X de 6 keV (^{55}Fe), la cathode employée est une paroi de 1 mm de béryllium. Pour les mesures avec les X de 27 keV (^{125}I) et de 22 keV (^{109}Cd), la cathode employée est en duralumin; elle a 0,4 mm d'épaisseur et elle coupe les divers rayonnements d'énergies inférieures à celle du pic principal (voir spectre Pl. 40).

Mesure :

Pour mesurer le rendement de transmission, la source avec un cache donnant un trou de ϕ 20 mm est placée derrière la grille collimatrice qui est près du cristal. Le rendement est égal au rapport des comptages, dans le pic principal du spectre, obtenus d'une part avec un cache analogue à la cathode placé entre la grille et le cristal, d'autre part sans cache.

Les résultats obtenus sont les suivants :

27 keV (^{125}I) avec 0,4 duralumin : 80 %

22 keV (^{109}Cd) avec 0,4 mm duralumin : 65 %

6 keV (^{55}Fe) avec 1 mm béryllium : 67 %

Un calcul d'ordre de grandeur, effectué en assimilant le duralumin à de l'aluminium, donne comme rendement de transmission d'après [33] :

$r_2 = 0,86$ pour des X de 27 keV

$r_2 = 0,76$ pour des X de 22 keV

D'après ([32] page 6) le rendement de transmission des X de 6 keV à travers une paroi de 1 mm de béryllium est de l'ordre de 60 %.

d) Rendement de détection de la chambre :

Calcul :

Le rendement de détection de la paroi est égal, approximativement, au coefficient d'absorption des X dans l'épaisseur de paroi que peuvent parcourir les β issus des effets photo-électriques dans le métal. Les X de l'iode 125 et du cadmium 109 donnent dans l'aluminium (raie $K_{\alpha\beta} = 1,5$ keV) des β d'énergie maximale 25,5 et 20,5 keV. Le parcours de ces β dans l'aluminium est ([29] page 624).

$x = 1,2$ mg/cm² pour 25,5 keV

$x = 0,85$ mg/cm² pour 20,5 keV

Le rendement de paroi est de $R_1 = 1 - e^{-\mu x}$

Pour $^{125}\text{I} \rightarrow 1 - e^{-1,4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}} \neq 1,7 \cdot 10^{-3}$

$^{109}\text{Cd} \rightarrow 1 - e^{-2,5 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3}} \neq 2,1 \cdot 10^{-3}$

Pour les X de 6 keV (^{55}Fe) le rendement de détection de la paroi est négligeable devant celui du gaz.

Dans le calcul du rendement de détection du gaz, l'absorption due au méthane est négligée. Les coefficients d'absorption massique de l'argon sont les suivants ([32] fig. 66) :

Pour 27 keV (^{125}I) $\rightarrow 4$ cm²/g

22 keV (^{109}Cd) $\rightarrow 7,7$ cm²/g

6 keV (^{55}Fe) $\rightarrow 250$ cm²/g

La masse spécifique de l'argon (T, N, P) étant 1,78 mg/cm³, la masse d'argon correspondant à une surface de 1 cm² dans l'espace détection de hauteur 12 mm rempli à 0,9 atmosphère est :

$x = 1,78 \cdot 12 \cdot 0,9 = 1,92$ mg/cm²

et le rendement de détection du gaz est : $R_2 = 1 - e^{-\mu x}$

Pour $^{125}\text{I} \rightarrow 1 - e^{-4 \cdot 1,92 \cdot 10^{-3}} \neq 0,8 \cdot 10^{-2}$

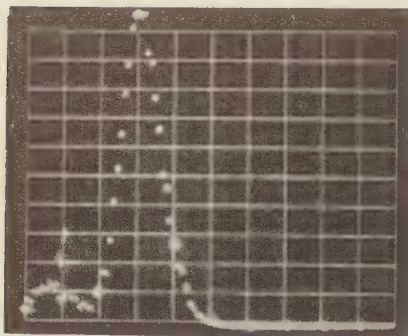
$^{109}\text{Cd} \rightarrow 1 - e^{-7,7 \cdot 1,92 \cdot 10^{-3}} \neq 1,5 \cdot 10^{-2}$

$^{55}\text{Fe} \rightarrow 1 - e^{-250 \cdot 1,92 \cdot 10^{-3}} \neq 0,38$

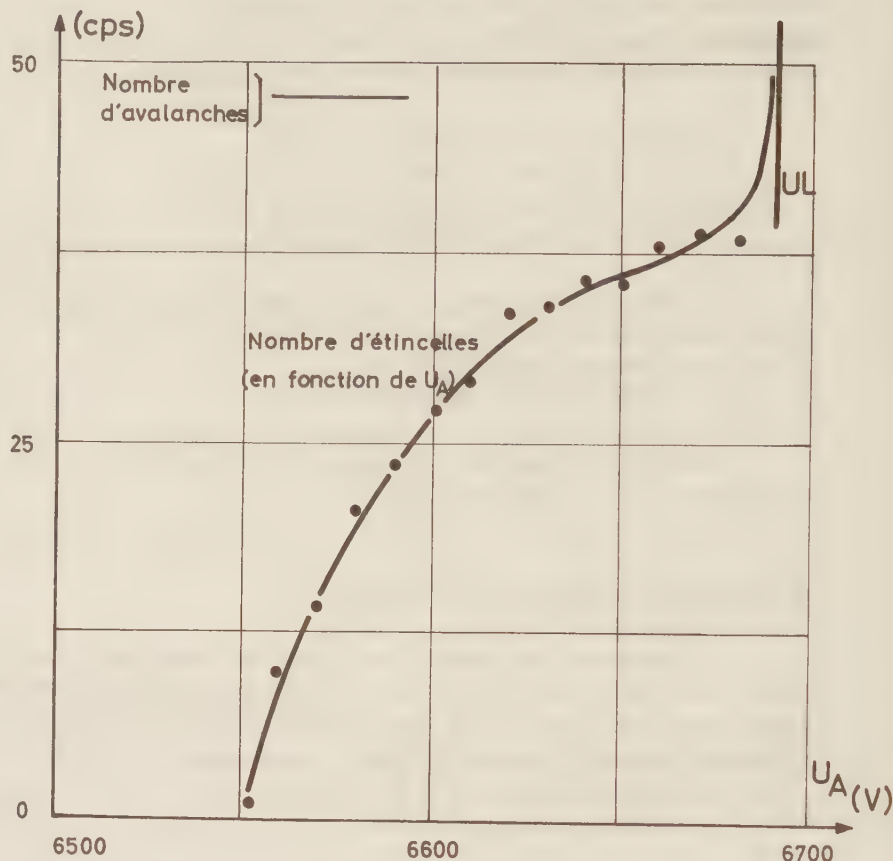
RENDEMENT DE LA CHAMBRE EN ETINCELLES ET EN AVALANCHES

I. SOURCE : ^{55}Fe

— Spectre des avalanches :

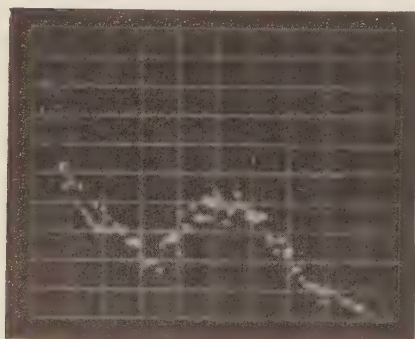


Le nombre d'avalanches détectables (avec $U_K = -400\text{V}$) est égal au nombre d'effets ionisants calculé en appliquant le rendement théorique de détection au nombre de particules incidentes



2. SOURCES : ^{109}Cd et ^{125}I

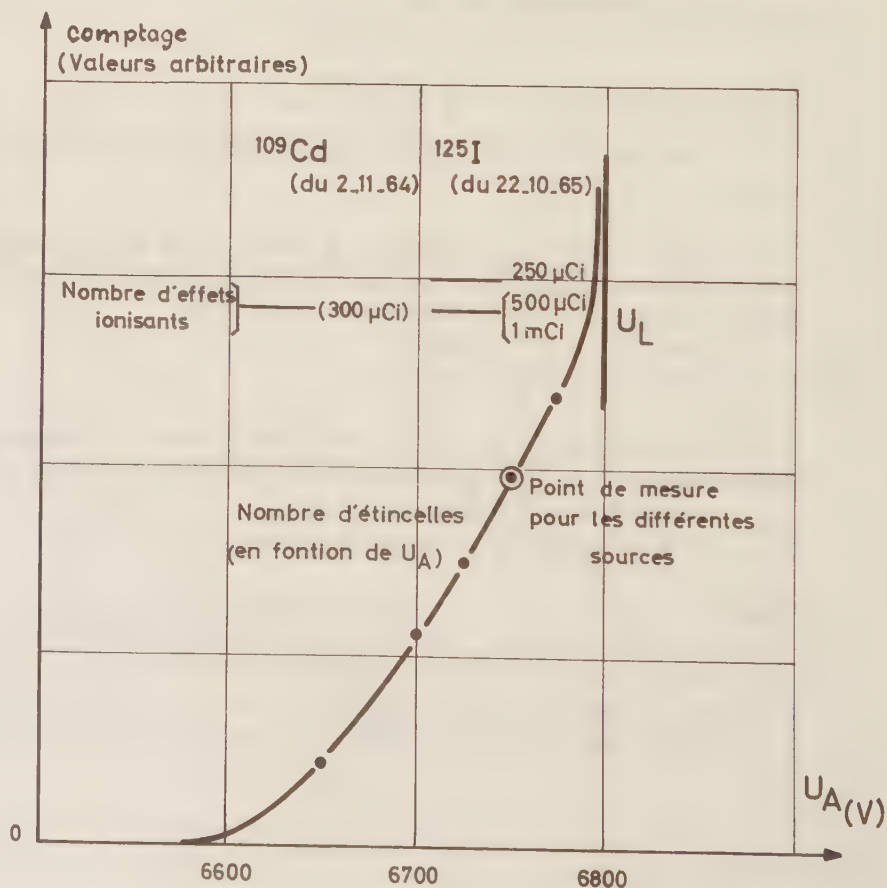
— Spectre des avalanches : (^{125}I)



Le nombre d'avalanche est un peu inférieur (10 à 20%) au nombre d'effets ionisants.

Dans la figure ci-contre, la même courbe de variation du nombre d'étincelles est prise comme référence pour des sources d'intensités diverses.

Le nombre d'effets ionisants donnés par chaque source est comparé au nombre d'étincelles données par cette source au point de mesure



Le rendement de détection de la chambre (paroi plus gaz) est donc :

$$R_1 + R_2$$
$$\begin{aligned} \text{Pour } {}^{125}\text{I} &\rightarrow (0,17 + 0,8) \cdot 10^{-2} = 0,97 \cdot 10^{-2} \\ {}^{109}\text{Cd} &\rightarrow (0,21 + 1,5) \cdot 10^{-2} = 1,7 \cdot 10^{-2} \\ {}^{55}\text{Fe} &\rightarrow = 0,38. \end{aligned}$$

e) Mesure du rendement de la chambre en avalanches :

Le rendement de la chambre en avalanches est déterminé en comparant le nombre d'avalanches produites par une source avec le nombre de particules pénétrant dans la chambre. Ce nombre de particules est compté avec le détecteur à scintillation arrosé par la source qui est placée dans les mêmes conditions qu'avec la chambre : le container contenant la source est près du détecteur avec un cache donnant un trou de ϕ 20 mm.

La source de 300 μ Ci de ^{55}Fe (du 2.11.64) avec un absorbant de 1 mm de Be donne avec le cristal 257 cps (dans le pic du spectre).

- le cristal a une fenêtre de 0,15 mm de Be.
- or 1 mm de Be donne une transmission de 0,67 soit $e^{-0,4}$ (avec 6 keV) donc 0,15 mm de Be donne une transmission de $e^{-0,06}$ soit 0,94, le nombre de particules arrivant dans la chambre est donc : $257 \cdot \frac{1}{0,94} = 274$.

La même source donne dans la chambre un spectre d'avalanches qui forme un pic assez étroit (si U_K n'est pas trop faible). Le nombre d'avalanches dans le pic ne varie pas avec la tension U_A correspondant à la plage utile ni avec la tension U_K tant que le spectre n'est pas déformé. (Pl. 41-1).

$$U_1 = 6725 \text{ V}$$

U_A	U_K	avalanches
6600 V	- 300 V	112/s
6650 V	- 300 V	106/s
6700 V	- 300 V	105/s
6600 V	- 200 V	116/s

Le nombre moyen d'avalanches 110/s correspond à un rendement de $\frac{110}{274} = 0,4$ (pour un rendement de détection, calculé, de 0,38).

Donc tous les effets ionisants donnent une avalanche.

Les X d'énergie un peu plus forte donnent avec la chambre un spectre d'avalanches plus complexe formé d'un pic et d'une montée d'allure exponentielle vers les basses amplitudes. Cette dernière partie est sans doute due aux X donnant une trace à cheval sur la grille ou à ceux donnant un effet photoélectrique dans la cathode (Pl. 41-2).

La source ^{125}I de 1m Ci du 22.10.65 donne avec la chambre :

comptage total brut : 10,66 cps	comptage net : 9 cps
bruit de fond : 1,7 cps	comptage dans le pic : 5,2 cps

Là même source mesurée 6 jours auparavant, sans absorbant, donne avec le cristal 1530 cps (dans le pic du spectre).

La décroissance depuis la mesure étant : $e^{-\text{Log } \frac{2.t}{60}} \neq 0,94$

Et la transmission dans la cathode étant 0,8

La source donne dans la chambre : $1530 \cdot 0,8 \cdot 0,94 = 1150$ cps.

Le rendement en avalanches est donc : $\frac{9}{1150} = 0,78 \cdot 10^{-2}$

Ce rendement en avalanches est un peu plus faible que le rendement théorique de détection qui dans ce cas donnerait :

$$1150 \cdot 0,97 \cdot 10^{-2} = 11,1 \text{ c/s}$$

f) Rendement de la chambre en étincelles :

La planche 41 donne sur les mêmes courbes, les variations du nombre d'étincelles en fonction de U_A (pour la valeur optimale de U_K) avec le nombre d'avalanches (courbe 1) ou avec le nombre d'effets ionisants (courbe 2).

Le nombre d'avalanches est mesuré sur la chambre avec la même source dans les mêmes conditions (sauf $U_K = 400$ V).

Le nombre d'effets ionisants est déduit des comptages faits avec le détecteur à scintillation en supposant le rendement réel de détection égal au rendement théorique calculé. Ce nombre est un peu supérieur au nombre d'avalanches détectables pour des X de 27 keV (+ 20 %). La courbe de variation du nombre d'étincelles est tracée avec une source donnée; plusieurs sources sont étudiées au même point A de référence sur cette courbe. Les droites figurant les nombres d'effets ionisants traduisent les rapports entre ce nombre et le nombre d'étincelles mesuré au point A pour chaque source. Les mesures et les calculs sont résumés dans le tableau suivant; les sources sont mesurées avec un cache donnant un trou de ϕ 20 mm dans les mêmes conditions que précédemment.

Sources	Comptage dans le cristal N_1/s	Particules traversant la chambre N_2/s	Effets ionisants dans la chambre N_3/s	Etincelles au point A de référence n/s
^{125}I 1m Ci (22.10.65)	1530	1190	11,5	7,5
^{125}I 500 μCi "	1000	775	7,5	4,7
^{125}I 250 μCi "	810	630	6,1	3,5
^{109}Cd 300 μCi (2.11.64)	1180	770	13	8,5

$$^{109}\text{Cd} \rightarrow N_2 = N_1 \times 0,65 \text{ (0,65 transmission de la fenêtre)}$$

$$N_3 = N_2 \times 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ (1,7} \cdot 10^{-2} \text{ rendement de détection)}$$

$$^{125}\text{I} \rightarrow N_2 = N_1 \times 0,8 \times 0,97 \text{ (0,8 : transmission de la fenêtre)}$$

(0,97 : décroissance de la source)

$$N_3 = N_2 \times 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ (9,7} \cdot 10^{-3} \text{ : rendement de détection)}$$

n = comptage net (bruit de fond déduit).

Dans les meilleures conditions (avec un plateau de comptage) le rapport du nombre d'étincelles utilisables sur le nombre d'effets ionisants est de l'ordre de $\eta = 0,8$. Autrement, en prenant une tension $U_A = U_L - 50$ V (pour obtenir un fonctionnement sûr) ce rapport est de l'ordre de $\eta = 0,6$. Ce rendement n'est obtenu que si le gaz n'est pas "usé" par un trop grand nombre d'étincelles (voir Pl. 41).

La chambre donne dans ces conditions (en prenant $\eta = 0,7$), avec le collimateur et les cathodes utilisés :

Pour ^{125}I environ 0,15 étincelle/s par μCi
 ^{109}Cd 0,20
 ^{55}Fe 4

2- Courbe de réponse de la chambre en fonction de l'intensité de la source :

a) Linéarité et limite de comptage :

Le rendement de la chambre a été mesuré avec des taux d'étincelles maximaux de quelques dizaines par seconde, ce paragraphe donne les limites qu'elle peut atteindre et son domaine de linéarité.

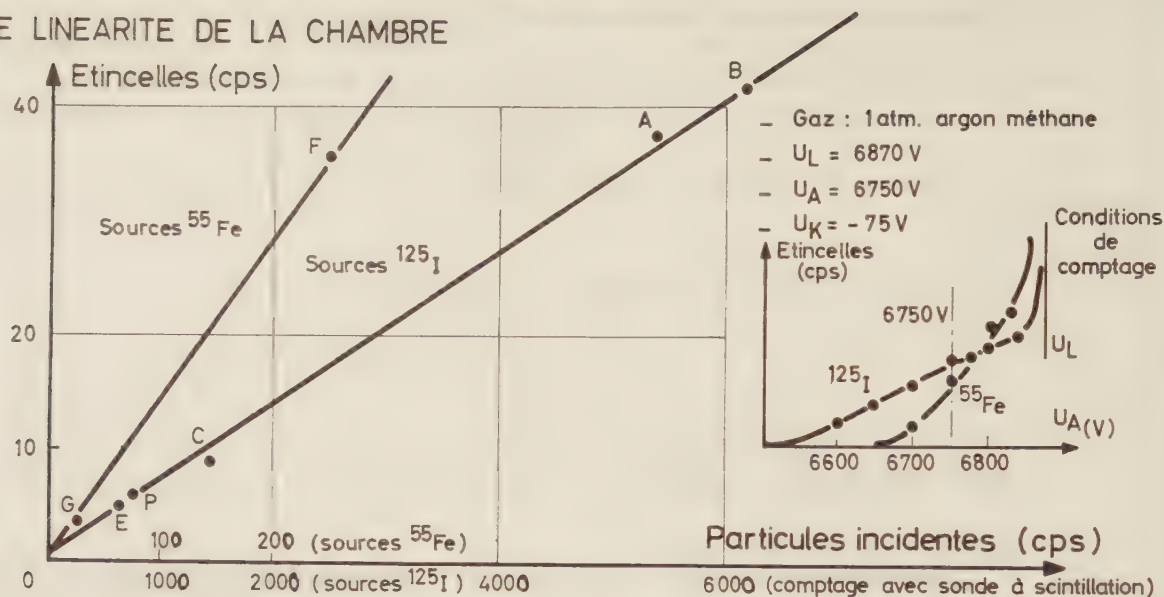
Avec un bon gaz, la chambre peut donner de manière continue, sans accrochage, un taux de 200 étincelles par seconde environ, sur toute sa surface (40 cm^2). Lorsque les étincelles se produisent sur une surface plus petite, la densité maximale d'étincelles au centimètre carré est plus importante mais l'image commence à se déformer au-dessus de 10 étincelles. $\text{s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ environ (voir IV-3-3). La courbe de réponse de la chambre (tableau ci-dessous et Pl. 42-1) est linéaire jusqu'à ces taux de comptage.

Points	Sources	Comptage avec cristal par seconde	Etincelles dans la chambre (comptage brut) par seconde
A	^{125}I 1mCi (16.3.66)	5360	37,6
B	500 μCi "	6170	42
C	1mCi (22.10.65)	1220	9
D	500 μCi "	787	5,9
E	250 μCi "	652	5
F	^{55}Fe 300 μCi (2.11.64)	257	37,9
G	100 μCi "	25	3,7

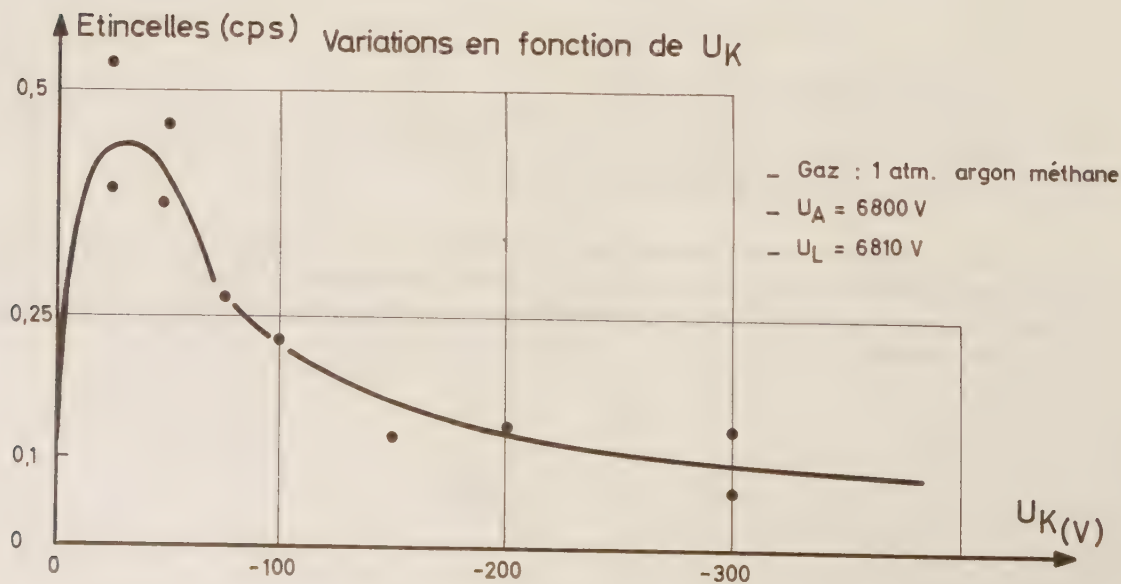
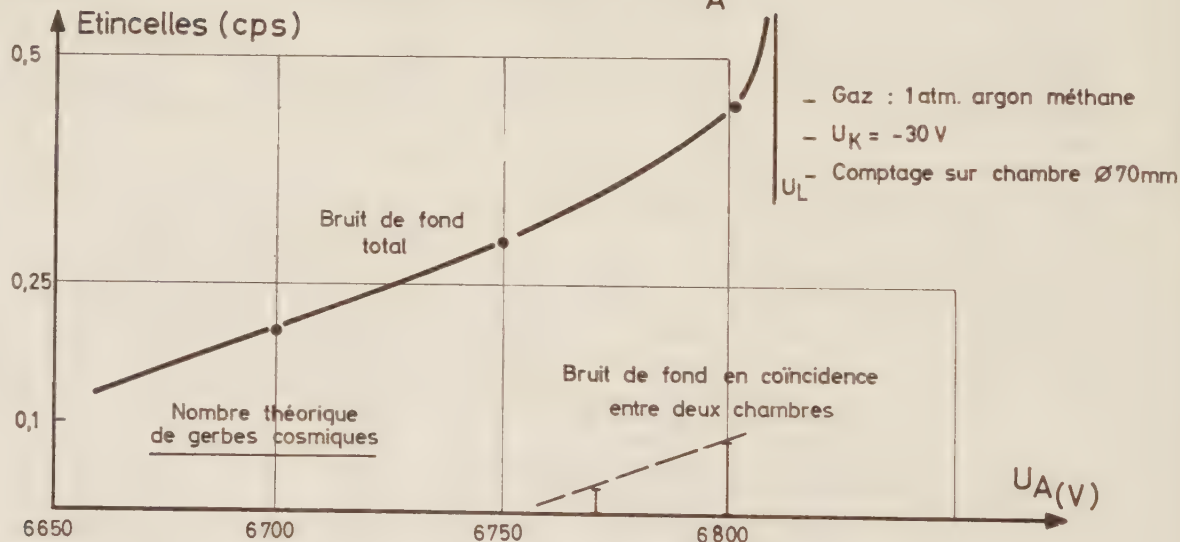
- le bruit de fond est de 0,3 cps
- les sources sont employées avec un cache donnant un trou de ϕ 20 mm ($S = 3\text{ cm}^2$)
- la tension U_A est réglée pour obtenir environ 40 étincelles par seconde avec les sources les plus actives (avec la tension U_K optimale).

Cette linéarité n'est obtenue que si la chambre se recharge, après une étincelle, avec une constante de temps courte (chambre de petite surface par exemple) voir (IV.4.1-a). Dans les autres cas, la perte de comptage due au temps mort peut devenir sensible au-dessus d'un taux d'une dizaine d'étincelles par seconde.

1. COURBE DE LINEARITE DE LA CHAMBRE



2. BRUIT DE FOND

Variations en fonction de U_A 

b) Bruit de fond de la chambre

Le bruit de fond normal de la chambre est de l'ordre de 0,3 étincelle par seconde; les mesures ci-dessous montrent qu'il est dû à des rayonnements extérieurs.

A ce bruit de fond peuvent s'ajouter des étincelles dues à des claquages parasites qui se produisent surtout lorsque le gaz se détériore ou lorsque la tension U_A est proche de la tension limite U_L . Ces étincelles parasites peuvent atteindre quelques coups par seconde et permettre encore un fonctionnement correct.

Enfin lorsque la chambre est défectueuse (défaut sur les électrodes ou gaz usé), il se produit des suites de décharges parasites.

Le bruit de fond normal varie avec les tensions U_A et U_K de la même manière que le comptage dû à une source (Pl. 42-2), ce qui prouve qu'il est dû à un rayonnement extérieur. Il varie de 0,2 à 0,4 cps pour une plage de 100 V de la tension de U_A en dessous de la valeur U_L ; il est de 0,1 cps quand la tension U_K est nulle ou très négative.

Une mesure de coïncidence entre 2 chambres donne quelques précisions sur l'origine des rayonnements provoquant le bruit de fond. La chambre de petite surface est placée sur la chambre de grande surface.

Toutes les étincelles de la petite chambre sont comptées sur une 1^o voie; une 2^o voie compte celles qui sont en coïncidence avec celles de la grande chambre (Pl. 42).

Il y a de l'ordre de 0,1 cps en coïncidence ce qui correspond au nombre de gerbes cosmiques traversant la petite chambre.

- nombre de cosmiques : $1.\text{min}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ environ

- nombre de gerbes : $\frac{1}{10}$ nombre de cosmiques environ

- nombre de gerbes dans la petite chambre : $\frac{0,1 \times 38,5}{60} = 6,4.10^{-2}/s$

Il peut donc y avoir dans le bruit de fond une composante de 0,1 cps environ dû aux gerbes cosmiques.

3- Localisation donnée par la chambre : Etude de la définition :

a) Généralités :

La définition de l'image est étudiée en vue de l'application pratique de la chambre : il s'agit de voir si elle est suffisante pour les applications médicales envisagées qui demandent une limite de définition de l'ordre de 1 cm. Des essais sont faits aussi pour voir comment varie la définition avec l'énergie du rayonnement détecté et comment elle est affectée par diverses conditions de fonctionnement.

La dispersion apportée par la chambre, sur la localisation d'un point d'un émetteur radioactif, est égale à la distance entre les projections, sur un plan parallèle aux électrodes, de l'étincelle et du point qui a émis le rayonnement. Cette dispersion dépend de la forme de la grille collimatrice et des dispersions qui ont lieu dans l'espace détection et dans l'espace étincelles; la dimension de l'étincelle est assez faible pour être négligée.

Chaque trou de la grille collimatrice permet aux X d'arroser un certain volume de l'espace

DEFORMATION DES IMAGES PAR DES ETINCELLES TROP NOMBREUSES

1. DEFINITION DONNEE PAR LA CHAMBRE AVEC DES MIRES

- Sources : ^{125}I
- Activité par mire : $300 \mu\text{Ci}$
- Essai avec chambre $\varnothing 160 \text{ mm}$
- Gaz : 1 atm argon méthane
- $U_L = 6150 \text{ V}$
- $U_A = 6100 \text{ V}$
- $U_K = -75 \text{ V}$
- Bruit de fond :
1,4 étincelle par seconde
- Comptage total :
10 étincelles par seconde (environ)
- 10^4 étincelles par photo
- Polaroid 42 - f/11

MIRES

Bandes : 10 mm
Intervalles : "



Bandes : 8 mm
Intervalles : "



Bandes : 6 mm
Intervalles : "



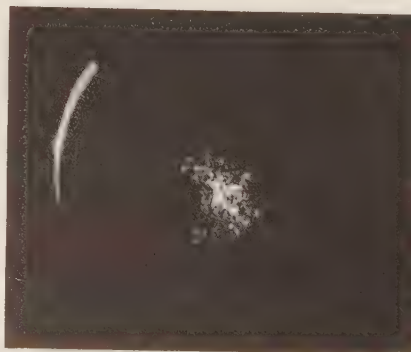
0 1 5 cm

2. INFLUENCE D'UN TAUX D'ETINCELLES TROP ELEVE : (cause principale de déformation des images)

- A : image normale : 12 cps
- B : image déformée : 60 cps
 $15 \text{ c.s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$
(surface source = 4 cm^2)

- Polaroid 42 - f/4,7
- 3000 étincelles par photo

0 1 5 cm



A



B

détection; le champ moyen, arrosé, sur la grille de la chambre à un rayon de 2,3 mm et le champ extrême à un rayon de 3,6 mm (Pl. 39-3); la surface arrosée dépend de la forme de la grille collimatrice et de la longueur de l'espace détection. De plus, chaque X détecté donne une trace primaire d'autant plus longue qu'il est plus énergétique (la trace est de quelques millimètres pour 27 keV); cette trace, dirigée obliquement, apporte une dispersion supplémentaire qui dépend de la nature du gaz employé et de la longueur de l'espace détection lorsque les traces sont très longues. Les électrons des traces primaires formées près de la cathode peuvent avoir une diffusion latérale pendant la migration vers la grille; cette dispersion varie surtout avec le champ appliqué sur l'espace détection. Enfin, lorsque l'étincelle se forme à partir d'une avalanche secondaire, l'effet des photons sur la cathode peut apporter une dispersion supplémentaire.

b) Définition de la chambre :

L'étude de la définition, faite avec la chambre de grande surface, décrite (III-3) et (Pl. 20 et 21) et avec des X de 27 keV (^{125}I), montre que cette définition correspond, à peu près, à la dispersion donnée par la géométrie de l'ensemble grille collimatrice-espace détection. La planche 43-1 montre qu'il est possible de séparer des bandes distantes de 8 mm (le rayon du champ extrême étant 3,6 mm).

La variation de densité des étincelles traduit la différence d'activité entre divers points de la source (les sources employées ne sont pas homogènes). Elle permet de distinguer aussi des bandes séparées par un espace de 6 mm qui se touchent sur l'image. Elle permet, dans certains cas, de voir l'image des trous de la grille : les étincelles se font, alors, principalement dans "le champ de pleine lumière", ce qui prouve que les dispersions apportées par la chambre sont faibles en général.

La définition de la chambre varie de manière importante avec l'énergie du rayonnement utilisé : la longueur de la trace primaire joue beaucoup sur l'image et, avec de l'argon méthane à une atmosphère, pour obtenir des images correctes, avec des X d'énergie de 50 à 150 keV, il faut réduire l'espace détection. La planche 44 donne les résultats obtenus avec la chambre de petite surface munie d'une cathode surélevée et avec un cache, sur la source, donnant un triangle de 3 cm de côté.

Les dispersions apportées par les autres facteurs sont plus faibles et, en général, elles n'ont pas été mises en évidence. Les images ne sont pratiquement pas modifiées par les variations des tensions U_K et U_A (Pl. 45). La principale distorsion observée est provoquée par une trop grande densité d'étincelles en un temps réduit; au-dessus de 10 étincelles $\text{s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$, environ, la densité de l'image ne reste pas uniforme, les étincelles ont tendance à se concentrer sur une surface plus réduite (Pl. 43-2).

Remarque sur la définition et le rendement

La géométrie de la grille collimatrice qui n'a pas été spécialement étudiée peut être améliorée. Cependant, dans la géométrie de l'ensemble grille collimatrice et espace détection, il y a un compromis à faire entre le rendement et la définition; en général tout changement améliorant le rendement diminue la résolution ou vice versa. Un paramètre peut toutefois améliorer à la fois le rendement et la localisation : en prenant un gaz rare plus lourd (du xénon à la place de l'argon), le rendement de détection est meilleur et les traces primaires plus courtes. Les études poursuivies au laboratoire sont faites avec du xénon à la place de l'argon.

4.- INFLUENCE DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA CHAMBRE :

Les caractéristiques de fonctionnement de la chambre sont fortement perturbées par les étincelles. Ces perturbations sont mises en évidence en étudiant l'influence de la résistance d'anode et celle de la capacité de la chambre qui jouent sur la vitesse de rétablissement de la haute tension après l'étincelle et sur l'énergie dépensée dans l'étincelle. Les modifications de ces paramètres peuvent améliorer les qualités de la chambre.

PL:44 INFLUENCE DE L'ENERGIE DU RAYONNEMENT SUR LA LOCALISATION

- Essais avec chambre: $\phi 70$ mm.
- Gaz : 1 atm. argon méthane.
- $U_A = U_L - 100$ V.
- $U_K = -50$ V.
- Bruit de fond = 0,3 étincelle par seconde
- Comptage : 3000 étincelles par photo.
- Poses: entre 200s et 300s
- Polaroid 42 - f/4,7.

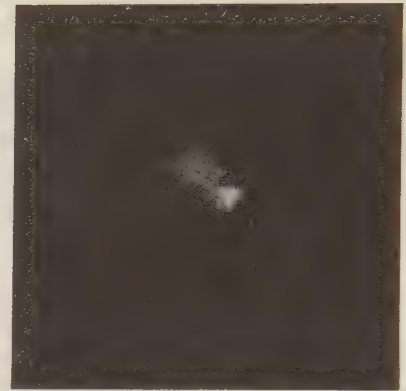
Forme de la source



0 1 5cm

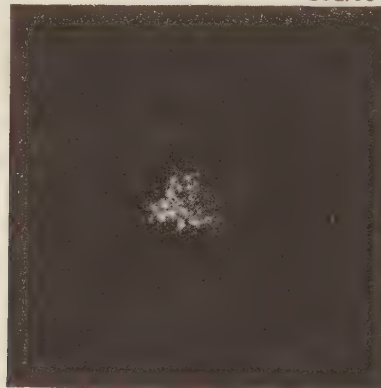
ESPACE DETECTION=10 mm

Source : ^{55}Fe (6 keV)

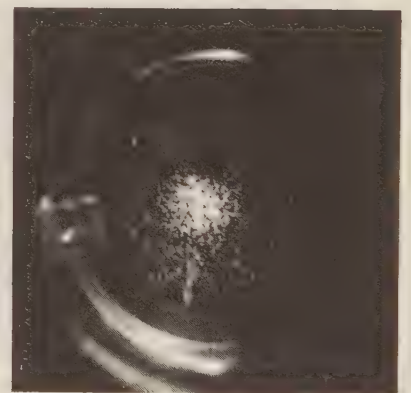


ESPACE DETECTION=5 mm

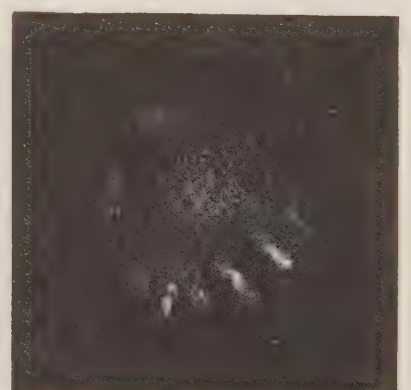
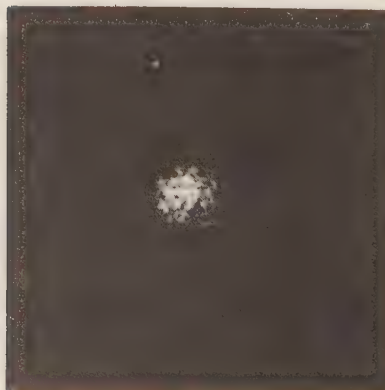
Source : ^{109}Cd (22 keV)



Source : ^{197}Hg (70 keV)



Source : ^{141}Ce (145 keV)



PL:45 INFLUENCE DES TENSIONS U_A et U_K SUR LA LOCALISATION

- Essais avec chambre: $\varnothing 70$ mm
- Gaz: 1 atm. argon méthane
- Espace détection = 12 mm
- Espace étincelles = 5 mm
- Bruit de fond inférieur à 0,5 étincelle par seconde
- Comptage
3000 étincelles par photo
- Polaroid 42-1/47-
- Source ^{109}Cd
100 μCi (environ)

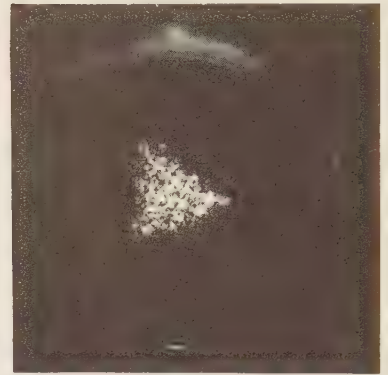
Forme de la source



0 1 5 cm.

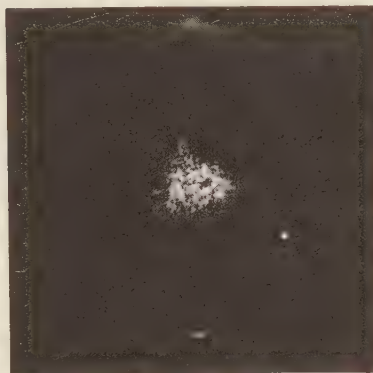
INFLUENCE DE LA TENSION U_K

4 $U_K = -1\text{V}$

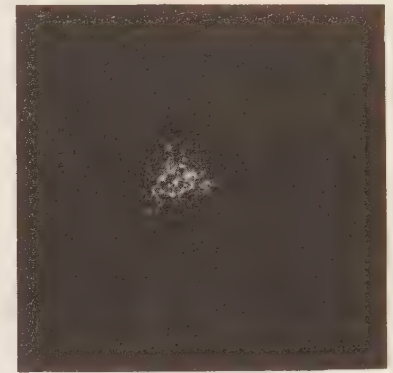


INFLUENCE DE LA TENSION U_A

1 $U_A = 6750\text{V} (=U_L - 10\text{V})$

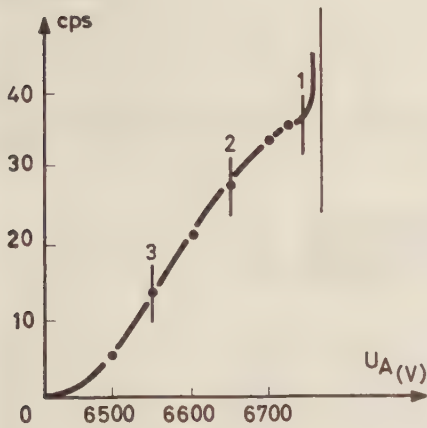


5 $U_K = -50\text{V}$



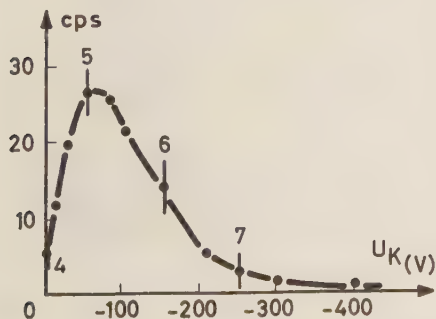
INFLUENCE DE LA TENSION U_A :

- $U_L = 6760\text{V}$
- $U_K = -50\text{V}$

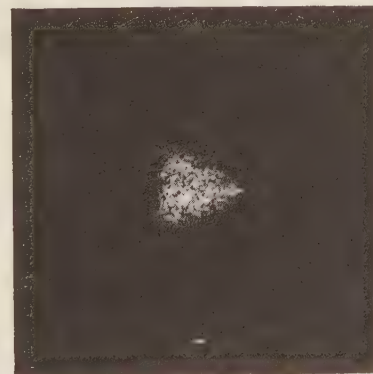


INFLUENCE DE LA TENSION U_K :

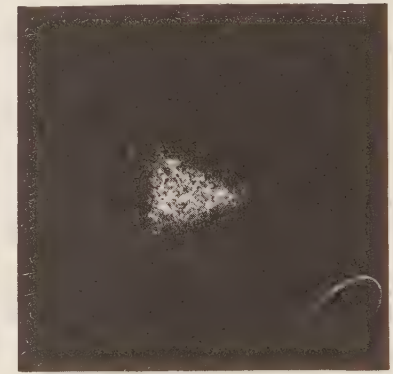
- $U_L = 6760\text{V}$
- $U_A = 6650\text{V}$



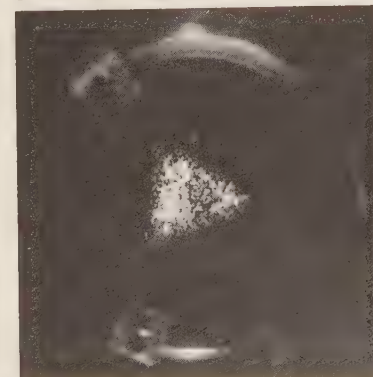
2 $U_A = 6650\text{V}$



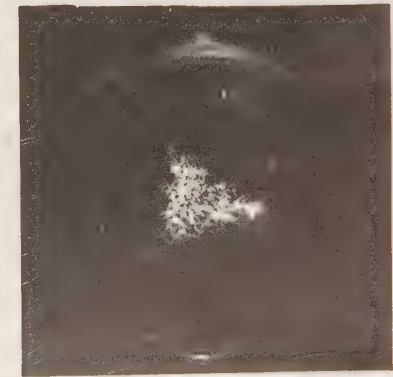
6 $U_K = -150\text{V}$



3 $U_A = 6550\text{V}$

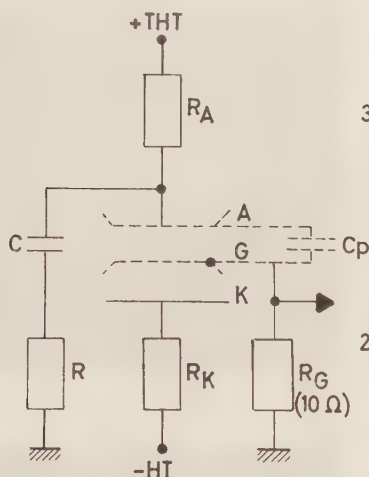


7 $U_K = -250\text{V}$

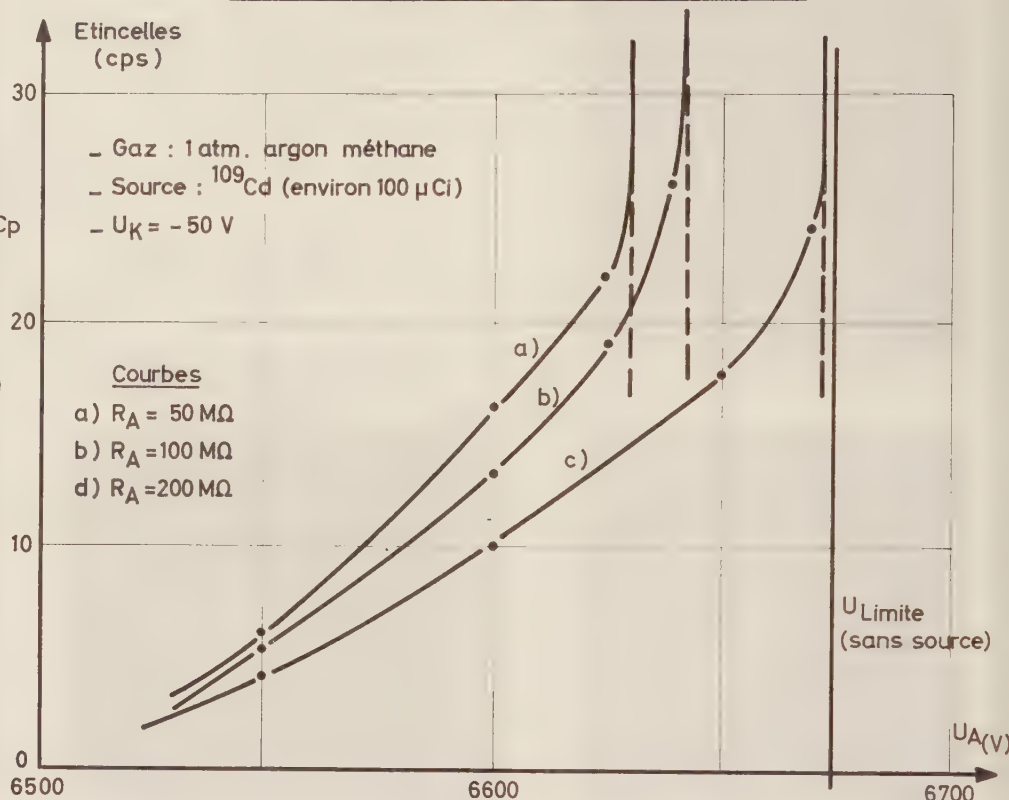


PL:46 INFLUENCE DE LA RESISTANCE D'ANODE ET DE LA CAPACITE DE LA CHAMBRE SUR LES ETINCELLES

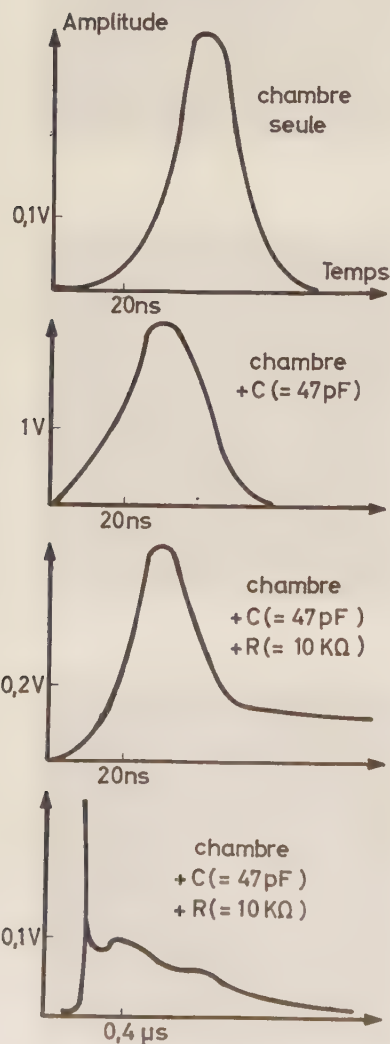
SCHEMA DE PRINCIPE



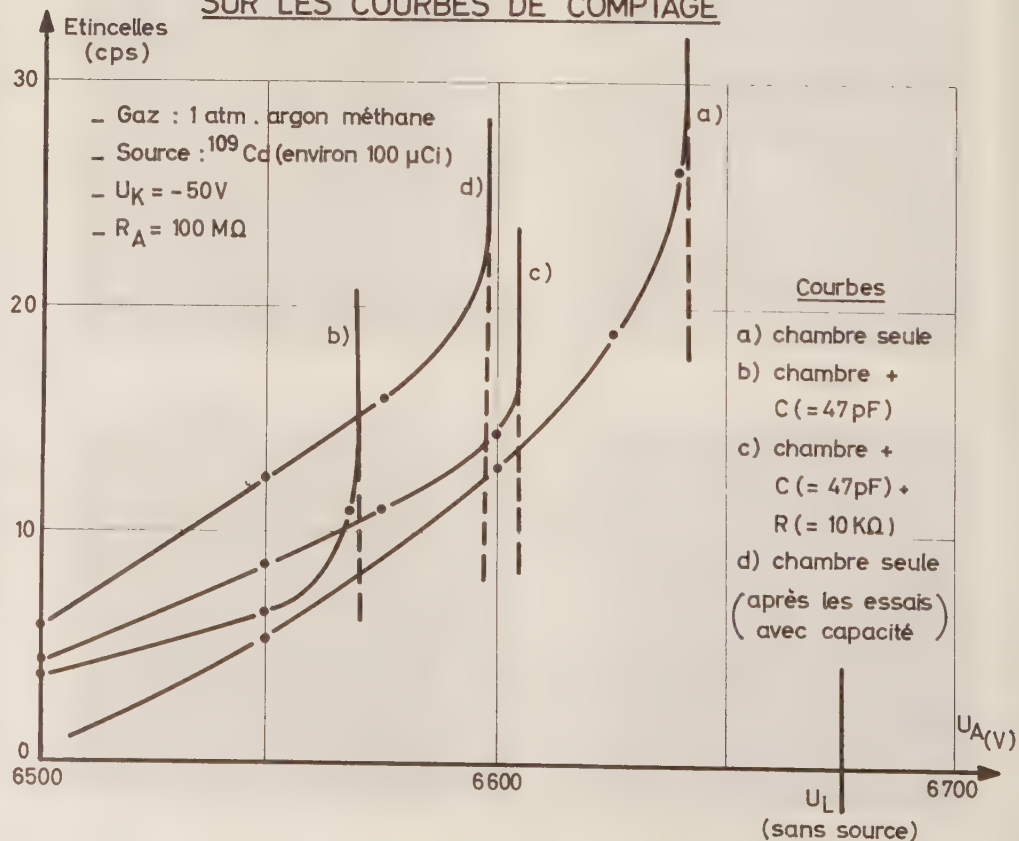
1. INFLUENCE DE R_A SUR LES COURBES DE COMPTAGE ET LA TENSION LIMITE



3. INFLUENCE DE LA CAPACITE SUR LES IMPULSIONS D'ETINCELLES



2. INFLUENCE DE LA CAPACITE SUR LES COURBES DE COMPTAGE



Les agents physiques extérieurs, lumière et température influencent également son comportement.

Les performances, enfin, dépendent beaucoup de la nature, de la qualité du gaz et des impuretés qu'il contient.

1.- Perturbations apportées par les étincelles et possibilités pour les limiter :

a) Influence de la résistance d'anode :

Dans la chambre à étincelles, le rétablissement de la haute tension, après la décharge dans l'étincelle, est assuré par l'intermédiaire d'une résistance d'anode R_A assez forte placée en série avec l'alimentation. La capacité de la chambre C_A (capacité propre due aux électrodes + capacité parasite par rapport à la masse) se recharge donc d'une manière exponentielle :

$$U_A = U_{THT} (1 - e^{-t/\tau}) \quad \tau = R_A \cdot C_A$$

Comme toutes les autres, cette chambre à étincelles nécessite, pour fonctionner correctement, un certain temps mort minimal entre le moment où se produit l'étincelle et celui où est rétablie la haute tension. Autrement la perturbation apportée par l'étincelle précédente provoque une suite d'étincelles parasites ou "accrochage". Avec la petite chambre la résistance R_A doit être supérieure à 10 ou 20 $M\Omega$ (comme $C_A = 10$ pF $\tau = 100$ à 200 μs)

Cependant, même lorsque la valeur de R_A est convenable, elle a une influence sur le comportement de la chambre comme le montrent les essais ci-dessous :

α) Sur les courbes de comptage en fonction de la tension U_A données par une même source (Pl. 46-1), la tension d'accrochage U_L décroît légèrement quand la résistance R_A passe de 200 à 50 $M\Omega$. Lorsque la résistance R_A est encore plus faible, le nombre maximal d'étincelles qu'on peut obtenir avec une source (avant l'accrochage) décroît.

β) Lorsque la tension U_A est réglée à la valeur U_L donnant l'accrochage, le taux de répétition des étincelles croît plus rapidement que $\frac{1}{\tau}$ lorsque R_A est inférieure à 100 $M\Omega$.

R_A ($M\Omega$)	20	30	50	100	200
comptage (cps)	4000	900	370	95	50
$\tau = RC$ (μs)	200	300	500	10^3	$2 \cdot 10^3$
$\frac{1}{\tau}$ (s^{-1})	5000	3300	2000	1000	500

γ) La valeur dont il faut diminuer la haute tension pour arrêter un accrochage est de quelques dizaines à une centaine de volts si $R_A > 100 M\Omega$; elle est de quelques centaines à un millier de volts si $20 M\Omega < R_A < 50 M\Omega$.

δ) Si R_A est importante, l'accrochage se fait sur une petite surface de quelques millimètres de diamètre; si R_A est faible, l'accrochage par contre se fait en un point.

Ces essais montrent que, à l'endroit de l'étincelle, il se produit une perturbation importante qui disparaît en quelques centaines de microsecondes. Si la tension U_A remonte assez rapidement, cette perturbation provoque une étincelle parasite à une tension nettement inférieure à la tension de

décharge U_d normale. La perturbation au voisinage de l'étincelle est plus faible mais peut durer jusqu'à plusieurs dizaines de millisecondes environ. Si U_A remonte suffisamment vite, elle peut y provoquer une étincelle parasite à une tension un peu inférieure à la valeur U_d . Les essais en fonction de la capacité C_A montreront qu'il se produit un autre changement des caractéristiques de la chambre qui dure nettement plus longtemps encore.

Ces phénomènes pourraient peut-être expliquer que la linéarité de la courbe de réponse de la chambre est, dans certains cas, meilleure que celle attendue de la formule donnant la perte de comptage due à un temps mort fixe T :

$$N = \frac{n}{1 - nT}$$

N : nombre total d'événements
 n : nombre d'événements obtenus avec le temps mort T .

La résistance R_A de 100 M Ω employée pour les mesures de linéarité donne un taux de 95 ét/s à l'accrochage, ce qui fait un temps mort de l'ordre de 10 ms. Il devrait y avoir comme perte de comptage avec une source :

Pour 5 ét/s $N = \frac{5}{1 - 5 \cdot 10^{-2}}$ perte 5 %

Pour 40 ét/s $N = \frac{40}{1 - 40 \cdot 10^{-2}}$ perte 40 %

Or la courbe de réponse est linéaire jusqu'à 40 étincelles par seconde. Les variations de caractéristiques apportées par une étincelle (normalement insuffisantes pour donner une étincelle parasite) peuvent, peut être, favoriser la formation d'une étincelle à partir d'un effet ionisant créé au voisinage; la nouvelle étincelle se formerait même si l'effet ionisant a lieu avant le rétablissement complet de la tension normale (la tension U_A est voisine de la valeur normale au bout de quelques constantes de temps τ , bien avant le temps T).

Il paraît donc possible, lorsqu'on peut utiliser une résistance d'anode pas trop forte, que la linéarité de la courbe de réponse soit meilleure qu'avec un blocage total de la chambre pendant un temps mort fixe.

b) Influence de la capacité de la chambre :

La capacité joue sur le temps de recharge de la chambre ($\tau = R_A \cdot C_A$) mais son action prépondérante tient à l'énergie qu'elle fournit à l'étincelle.

Une augmentation de la constante de temps τ devrait augmenter la tension limite U_L et diminuer le comptage obtenu avec une source à une tension U_L donnée (Pl. 46-1). Une augmentation de la capacité C_A (obtenue en mettant une capacité additionnelle entre l'anode et la masse) diminue la tension U_L et augmente le comptage obtenu avec une source à une tension U_A donnée; elle diminue notablement le nombre maximal d'étincelles qu'il est possible d'obtenir avec une source donnée avant la tension limite U_L (Pl. 46-2); les étincelles, enfin, sont beaucoup plus brillantes.

Lorsque la capacité de la chambre est plus grande, il y a donc une augmentation de l'énergie transportée par les étincelles, ce qui accroît les perturbations créées. Cela se traduit d'une part par une augmentation de la sensibilité apparente de la chambre qui fonctionne à une tension U_A un peu plus basse, phénomène qui persiste un moment après la disparition des fortes étincelles (Pl. 46-2).

D'autre part, surtout, les performances de la chambre sont nettement réduites : on ne peut obtenir autant d'étincelles avec une source donnée.

Or les chambres pour usage médical doivent avoir une surface assez importante, ce qui en-

traîne une capacité assez forte; il est donc nécessaire d'en atténuer les effets.

Une résistance supérieure à 1 k Ω , placée en série avec la capacité additionnelle entre l'anode de la chambre et la masse, atténue l'effet de cette capacité. La luminosité des étincelles est réduite, les charges apportées par la capacité ne se déchargent pas brusquement mais d'une manière plus étalée (Pl. 46-3) et la perturbation est plus faible : le taux maximal d'étincelles que peut donner une source est plus grand (Pl. 46-2).

c) Possibilités pour limiter les perturbations apportées par les étincelles :

Pour atténuer la perturbation provoquée par la capacité importante des chambres de grande surface, il y a deux possibilités :

α) mettre un verre, formant résistance, entre l'anode et l'espace étincelles :

Des chambres à étincelles, en régime déclenché, ont donné de bons résultats avec des électrodes conductrices externes sur verre [15]. Les "hodoscopes à tubes de néon" [34] ont également fonctionné en régime déclenché avec une enveloppe de verre entre le gaz et les électrodes; les auteurs ont cependant signalé que le verre ne doit pas avoir un isolement trop important.

Un essai a été fait avec un verre placé contre l'anode dans l'espace étincelles. Il n'a pas été possible d'obtenir d'étincelles avec une source et cette voie a été abandonnée.

β) employer, comme anode, un dépôt sur verre, situé du côté de l'espace détection, et ayant une certaine résistance.

Cet essai est fait en remplaçant l'anode de la chambre de petite surface par un dépôt, sur verre, d'oxyde d'étain ayant une résistance carrée de 300 Ω . Le fonctionnement est aussi bon qu'avec une grille conductrice comme anode : la localisation est bonne le rendement et le bruit de fond sont analogues.

Cette voie est poursuivie depuis, au laboratoire. Avec des verres ayant une résistance carrée de l'ordre de quelques milliers d'ohms, les étincelles sont plus fines et les perturbations réduites : il est possible d'avoir un fonctionnement correct avec des chambres de diamètre 20 cm.

2- Influence de la lumière et de la température ambiante sur le fonctionnement de la chambre :

a) Influence de la lumière

L'action de la lumière ambiante n'est guère sensible sur le fonctionnement de la chambre. Quelques anomalies ont été remarquées quand la chambre est au soleil par rapport à son fonctionnement normal : légère augmentation de la sensibilité apparente et du bruit de fond.

Quelques essais avec une lampe d'éclairage précisent l'action de la lumière. La lumière favorise le déclenchement des étincelles : la courbe de comptage en fonction de la tension U_A est décalée de quelques dizaines de volts vers les valeurs plus faibles de U_A et la chambre accroche plus facilement (Pl. 47-1). Elle semble principalement augmenter les effets secondaires (Pl. 47-1). L'emploi de différents filtres montre qu'elle agit par les rayons infrarouges; il ne s'agit pas d'un phénomène thermique car il va à l'encontre des observations faites avec la température. Il est possible qu'il y ait un rapport d'énergie sous forme de vibration moléculaire lors de l'absorption des rayons infrarouges par les molécules de méthane.

b) Influence d'une variation de la température ambiante :

La température ambiante a une influence assez importante sur la stabilité de la chambre.

1. INFLUENCE DE LA LUMIERE :

_ sur les courbes de variation du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_A

_ sur les impulsions d'avalanches
(étude par méthode électrique)

_ source ^{109}Cd

_ $U_L = 6500\text{V}$

_ $U_d = 6450\text{V}$ (environ)

_ $U_A = 6300\text{V}$

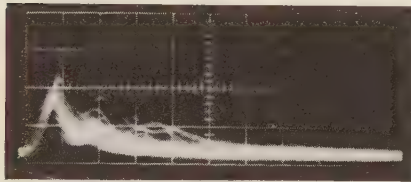
_ $U_K = -400\text{V}$

_ polaroïd 47_ F/1,9

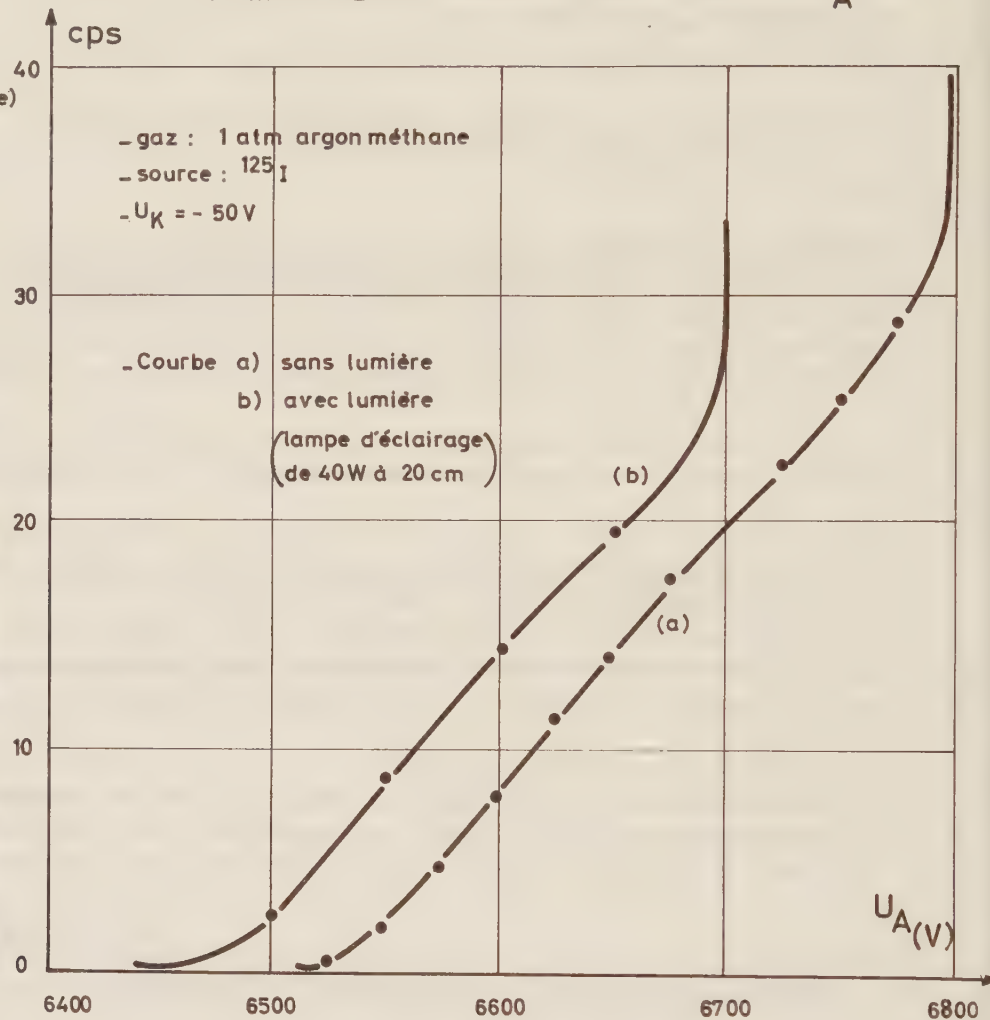
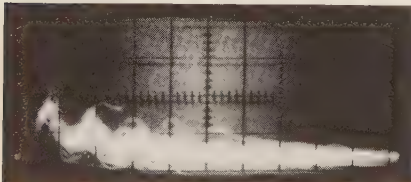
_ 5 mV / carreau

_ 100 ns / carreau

sans lumière



avec lumière (lampe 40W à 20 cm)



2. INFLUENCE D'UNE VARIATION DE LA TEMPERATURE AMBIANTE SUR L'EVOLUTION DU COMPTAGE EN ETINCELLES :

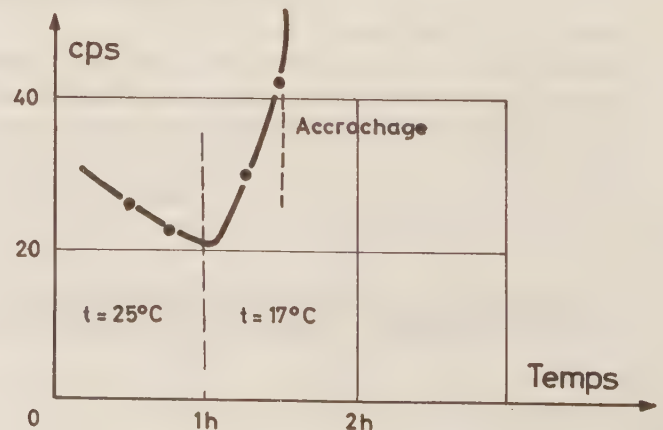
_ gaz : 1 atm. argon méthane

_ source : ^{125}I

_ $U_L = 6350\text{V}$

_ $U_A = 6280\text{V}$

_ $U_K = -50\text{V}$



Une variation d'une dizaine de degrés modifie le fonctionnement de la chambre; la sensibilité apparente croît quand la température ambiante décroît (Pl. 47-2).

3- Influence de la qualité du gaz sur le fonctionnement de la chambre :

a) Evolution générale d'une chambre :

En général, les performances de la chambre décroissent avec le temps : le nombre d'étincelles dans des conditions données diminue ainsi que le nombre maximal d'étincelles qu'il est possible d'obtenir avec une source.

A cette évolution générale s'ajoutent parfois des variations accidentelles : la variation d'un paramètre, tel que la température, fait évoluer la chambre qui change de courbe caractéristique de fonctionnement. La chambre peut alors se stabiliser, ou, si la nouvelle caractéristique correspond à une tension U_L inférieure à la tension U_A appliquée, il se produit un accrochage (Pl. 47-2).

La diminution des performances provient d'une dégradation de la qualité du gaz qui a deux origines différentes.

- le dégazage des matériaux contenus dans la chambre
- les effets produits par les étincelles.

b) Rôle de certains matériaux sur l'évolution de la chambre

Le gaz se dégrade plus rapidement quand la chambre contient des matériaux organiques. La dégradation peut être très rapide : les joints en néoprène donnent une décroissance du comptage en quelques heures (Pl. 48-1); c'est pourquoi ils sont remplacés par des joints d'indium.

La plupart des essais sont faits avec des supports d'électrodes et des cavaliers en plexiglas. Le plexiglas entraîne aussi une dégradation du gaz mais elle est beaucoup plus lente, surtout lorsque ce matériau a séjourné un certain temps dans la chambre.

Un remplissage peut durer de quelques jours à quelques semaines. La baisse de comptage s'accompagne d'une déformation de la courbe caractéristique de comptage en fonction de U_K qui devient plus plate et plus basse. L'évolution de ce montage est donnée plus détaillée un peu plus loin (Pl. 48-2 Pl. 49).

Lorsque la chambre ne contient pas de plexiglas (supports d'électrodes métalliques (Pl. 25-3) et cavaliers en afcodur), son évolution est plus lente (Pl. 48-3). La tension U_A de fonctionnement est inférieure de quelques centaines de Volts et la courbe de comptage en fonction de U_K se déforme peu. Cependant, pendant quelques heures après le remplissage, ce montage présente des accrochages parasites.

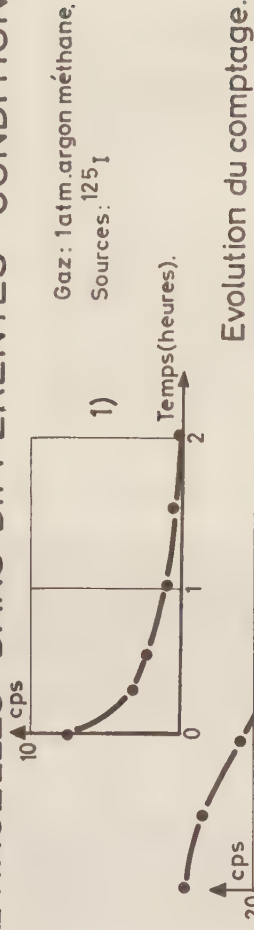
La méthode la plus simple pour pallier la dégradation du gaz est de faire une circulation quand le gaz employé est bon marché comme l'argon méthane. La plupart des essais sont faits avec une circulation de gaz. Le montage employé est simple, il ne donne pas une grande stabilité mais il permet un fonctionnement correct de la chambre avec un débit de l'ordre de 11/h. Le débit est réglé par la vis pointeau de gaz; l'évacuation de ce gaz se fait par un tube en U dont le bas contient du mercure : le gaz s'échappe par bulles pour une surpression de quelques mm de Hg. Les conditions de fonctionnement et les résultats obtenus sont analogues d'un jour à l'autre; le comptage est à peu près constant. La courbe de comptage en fonction de la tension U_K ne se déforme pas (Pl. 48-4).

c) Dégradation du gaz provoquée par les étincelles

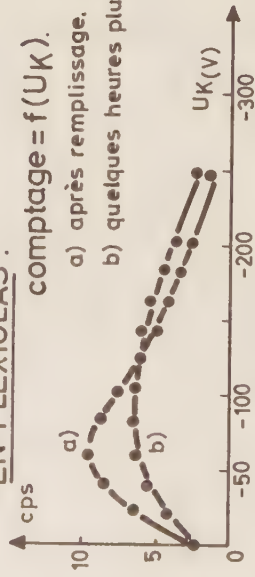
L'essai d'usure est fait en provoquant un grand nombre d'étincelles dans la chambre (fermée,

PL:48 STABILITE DU COMPTAGE EN ETINCELLES DANS DIFFERENTES CONDITIONS

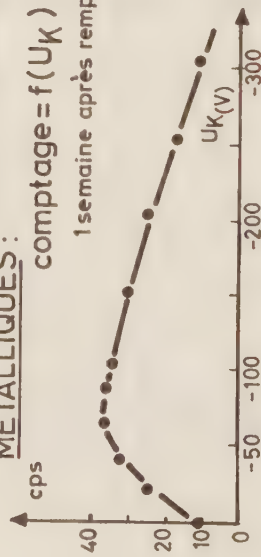
1- CHAMBRE AVEC JOINTS DE NEOPRENE :



2- CHAMBRE AVEC SUPPORTS D'ELECTRODES EN PLEXIGLAS :

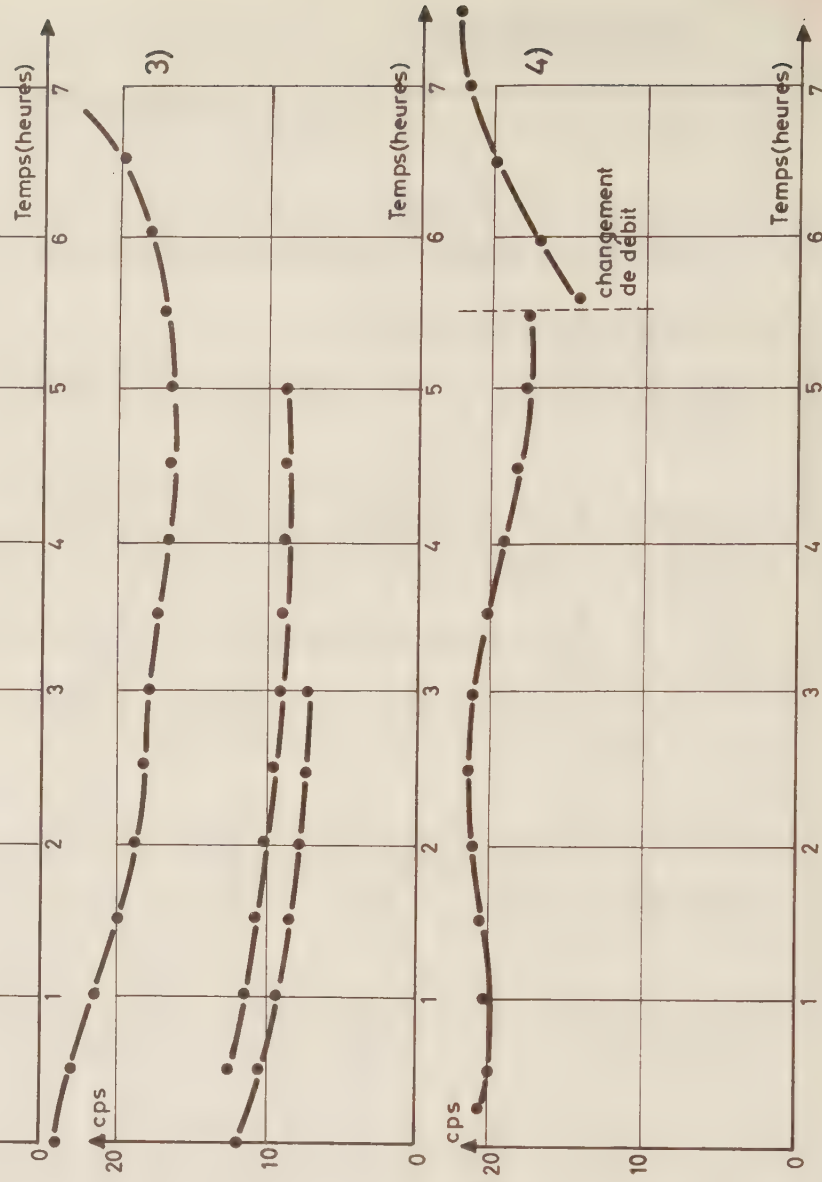


3- CHAMBRE AVEC SUPPORTS D'ELECTRODES METALLIQUES :



4- CHAMBRE FONCTIONNANT AVEC CIRCULATION DE GAZ :

(supports d'électrodes en plexiglas).
La courbe caractéristique du nombre d'étincelles en fonction de la tension U_K n'évolue pas.

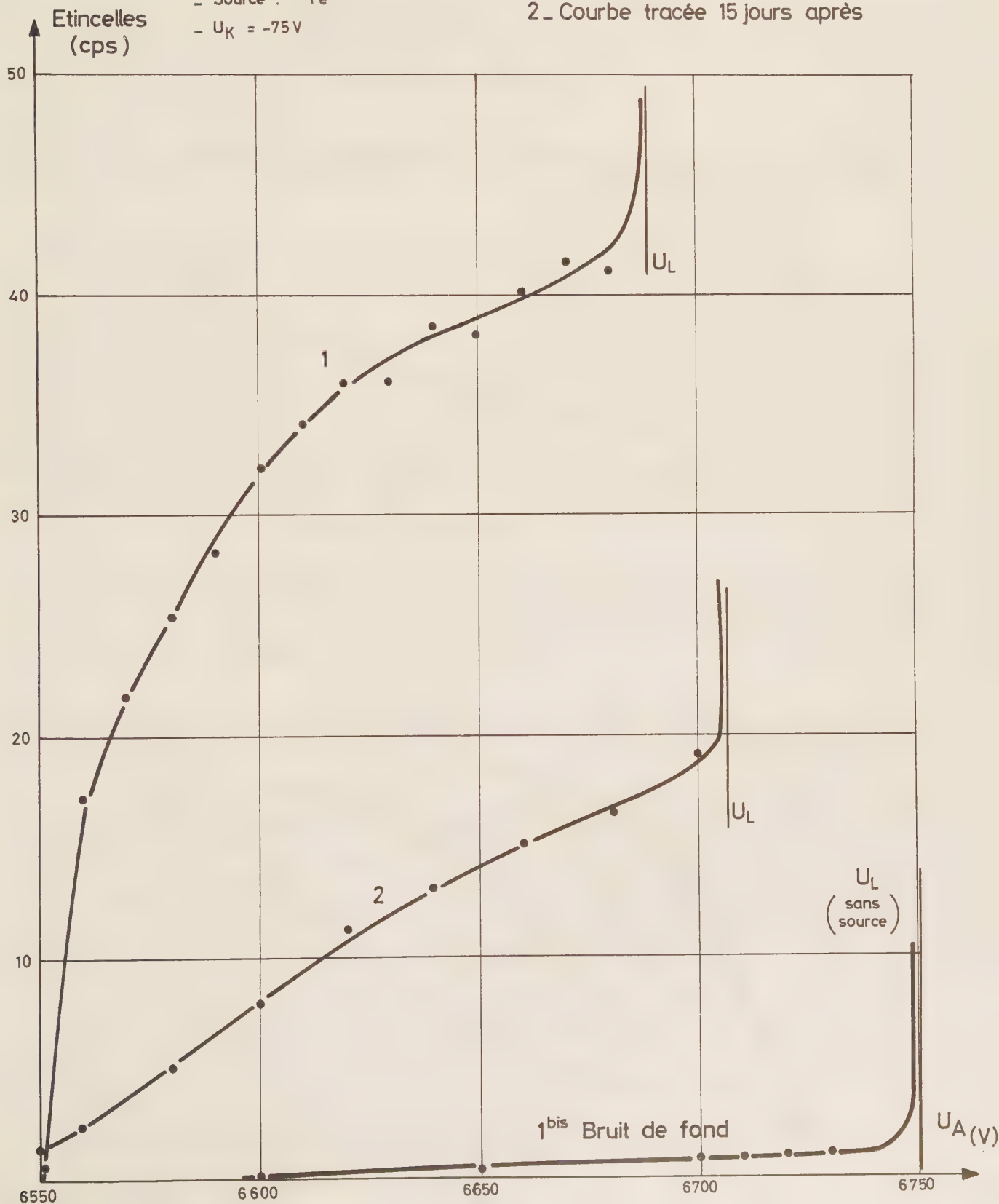


PL:49 EVOLUTION DE LA COURBE DE VARIATION DU NOMBRE D'ÉTINCELLES EN FONCTION DE LA TENSION U_A LORSQUE LE GAZ DE REMPLISSAGE SE DEGRADE

- Gaz : 1atm. argon méthane
- Source : ^{55}Fe
- $U_K = -75\text{V}$

1_ Courbe tracée le jour de remplissage

2_ Courbe tracée 15 jours après

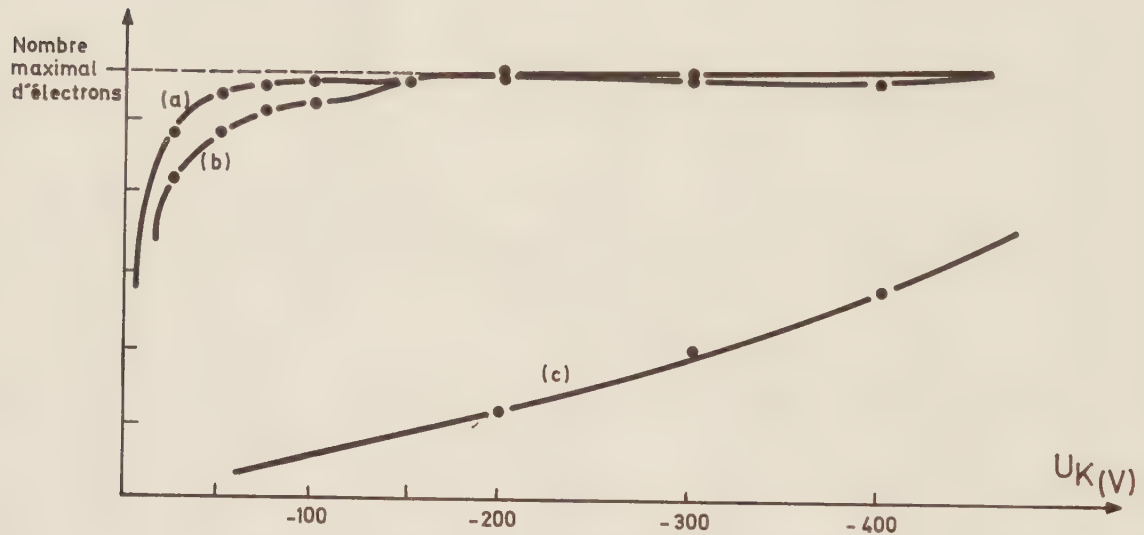


PL: 49 bis EVOLUTION DE LA COLLECTION DES ELECTRONS DANS L'ESPACE DETECTION LORSQUE LE GAZ SE DEGRADE

1.

COLLECTION

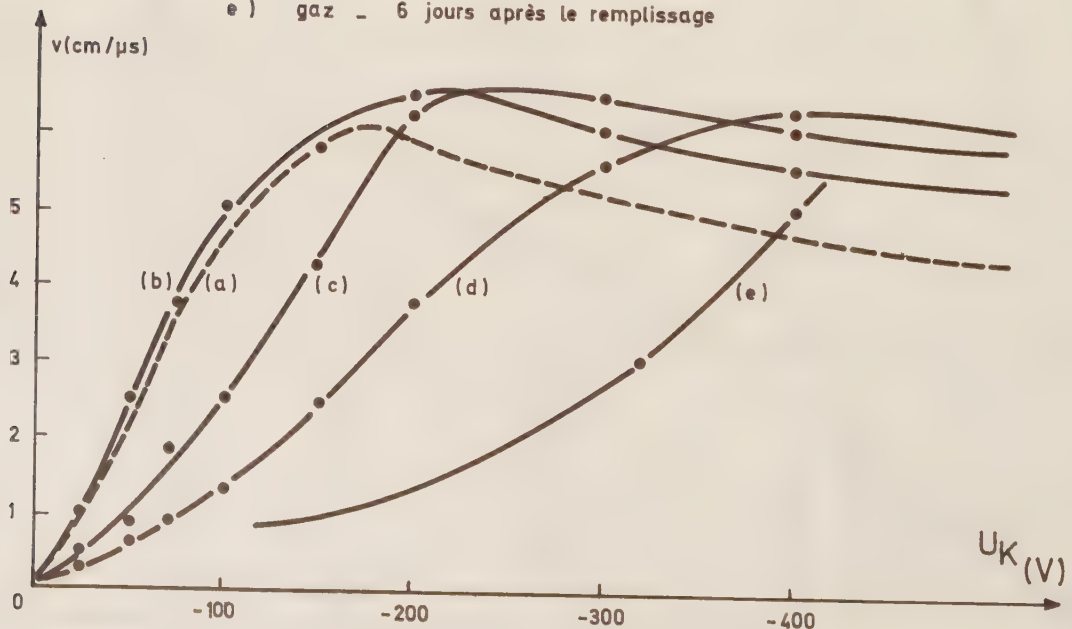
- a) gaz - après quelques heures de fonctionnement
(conditions normales avec circulation)
- b) gaz - 1 jour après le remplissage
- c) gaz - 6 jours après le remplissage



2.

VITESSE DE DERIVE

- a) argon (90 %) méthane (10 %) à 1 atm. d'après [35]
- b) gaz frais (après vide assez long sur la chambre)
- c) gaz après quelques heures de fonctionnement
(conditions normales avec circulation)
- d) gaz - 1 jour après le remplissage
- e) gaz - 6 jours après le remplissage



sans circulation). Les performances décroissent puis la chambre devient inutilisable :

- ≈ 200 ét/s de 0 à $2 \cdot 10^5$ étincelles, puis accrochage
- ≈ 100 ét/s de $2 \cdot 10^5$ à $7 \cdot 10^5$ étincelles
- ≈ 60 ét/s de $7 \cdot 10^5$ à $9,5 \cdot 10^5$ étincelles

La chambre accroche en permanence et devient inutilisable entre $9,5 \cdot 10^5$ et 10^6 étincelles.

Après cet essai, une analyse du gaz de la chambre en spectrographie infrarouge donne une pression partielle de 70 mm Hg de méthane (destruction de quelques mm Hg) et, en plus des gaz originaux, de l'acétylène sous une pression partielle de 10 mm Hg. Cette mesure quantitative approchée donnerait donc une quantité d'acétylène supérieure à celle que pourrait fournir le méthane détruit. De toute façon il y a de l'acétylène créé en quantité assez importante; cependant il y a certainement d'autres corps créés, qui ne sont pas mis en évidence sur le spectre infrarouge, car l'acétylène ne paraît pas seul responsable des modifications de caractéristiques de la chambre, comme le montrent les essais ci-dessous.

d) Modification des caractéristiques de la chambre avec la dégradation du gaz.

Le gaz est dégradé à la fois par le dégazage des matériaux et par les étincelles dans un montage ayant eu un remplissage sans circulation.

Les étincelles ont lieu sur une même plage de la tension U_A ; mais le nombre d'étincelles, obtenues avec la même source à une tension U_A donnée et avec la même valeur de U_K , décroît de manière importante. La courbe donnant le nombre d'étincelles en fonction de U_K est plus aplatie et le maximum, plus faible, est décalé vers les valeurs plus négatives de U_K (voir Pl. 48 et 49). Les impulsions d'avalanches paraissent un peu plus étalées; le nombre d'électrons contenus dans les avalanches (lorsque $U_K = 400$ V) et le coefficient de multiplication α sont un peu plus faibles à une même tension U_A ; l'évolution du spectre des avalanches varie un peu différemment quand la tension U_K devient moins négative : le nombre d'électrons contenus dans les avalanches décroît plus vite (voir Pl. 33).

Dans cette évolution il peut intervenir une modification du coefficient de multiplication des avalanches. Mais l'évolution semble surtout due aux phénomènes qui se passent dans l'espace de détection. La vitesse de dérive des électrons devient plus faible et la perte de ces électrons pendant leur collection devient plus importante et se produit pour des valeurs plus négatives de U_K (voir Pl. 49bis).

e) Caractéristiques de la chambre lorsqu'elle contient de l'acétylène :

La chambre est essayée avec un remplissage neuf de 1 atmosphère d'argon méthane contenant 15 mm Hg d'acétylène.

La tension U_A de fonctionnement est abaissée de quelques centaines de Volts. La courbe de comptage en fonction de la tension U_A , pour une tension U_K de - 75 V, a la forme normale mais le nombre d'étincelles est faible (inférieur à 20 cps pour une source donnant environ 80 cps); l'acétylène a donc un effet néfaste dans ces conditions. Lorsque la tension U_K est assez négative ($U_K = 400$ V) la courbe de comptage en fonction de la tension U_A n'a plus la forme normale déjà vue, elle commence toujours pour des tensions un peu plus fortes que la précédente, mais elle s'étend sur environ 150 V et permet un comptage important (60 cps) avec la source (Pl. 50-1).

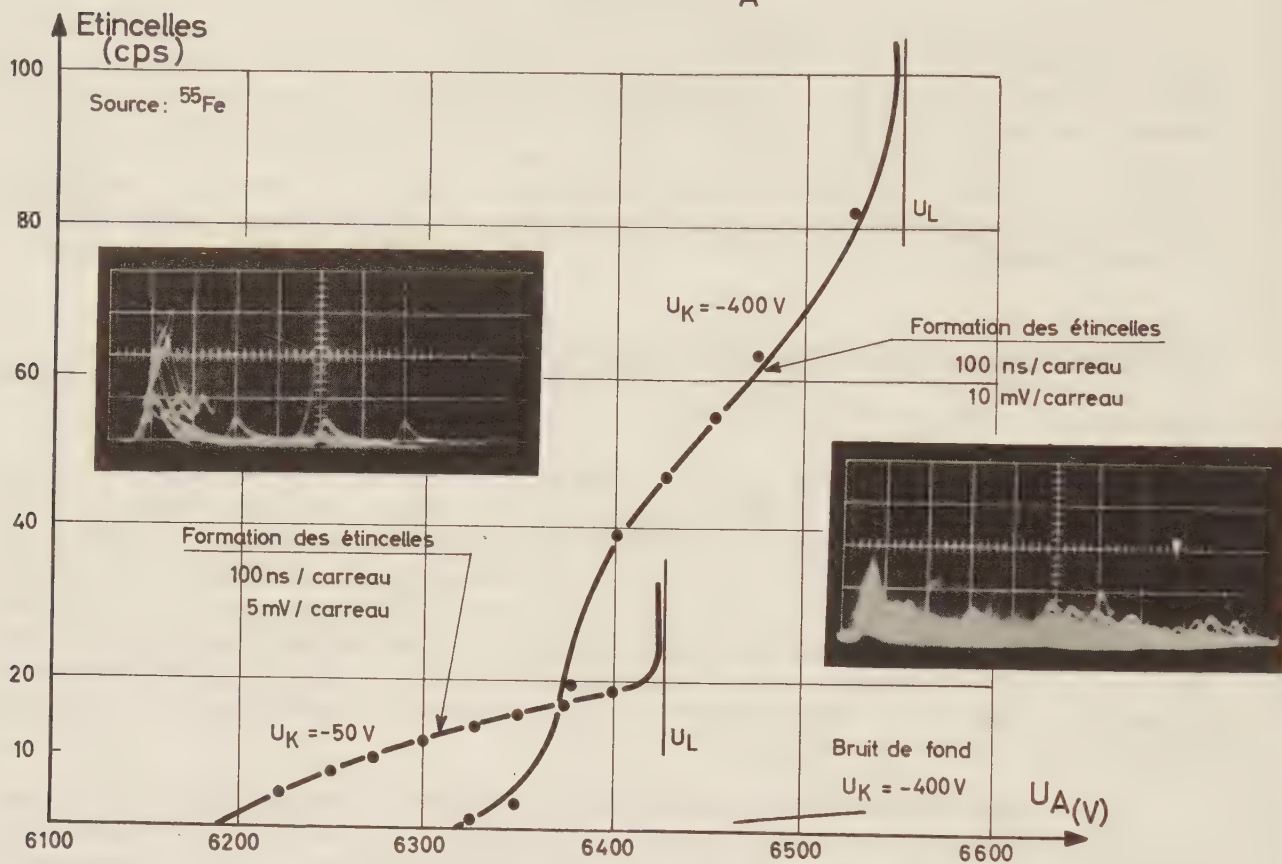
La courbe de comptage en fonction de la tension U_K change beaucoup également, le comptage maximal a lieu pour des valeurs plus négatives de U_K (- 200 à - 400 V) et il décroît très lentement ensuite (Pl. 50-2).

Ces modifications des courbes caractéristiques sont dues à un changement du mode de forma-

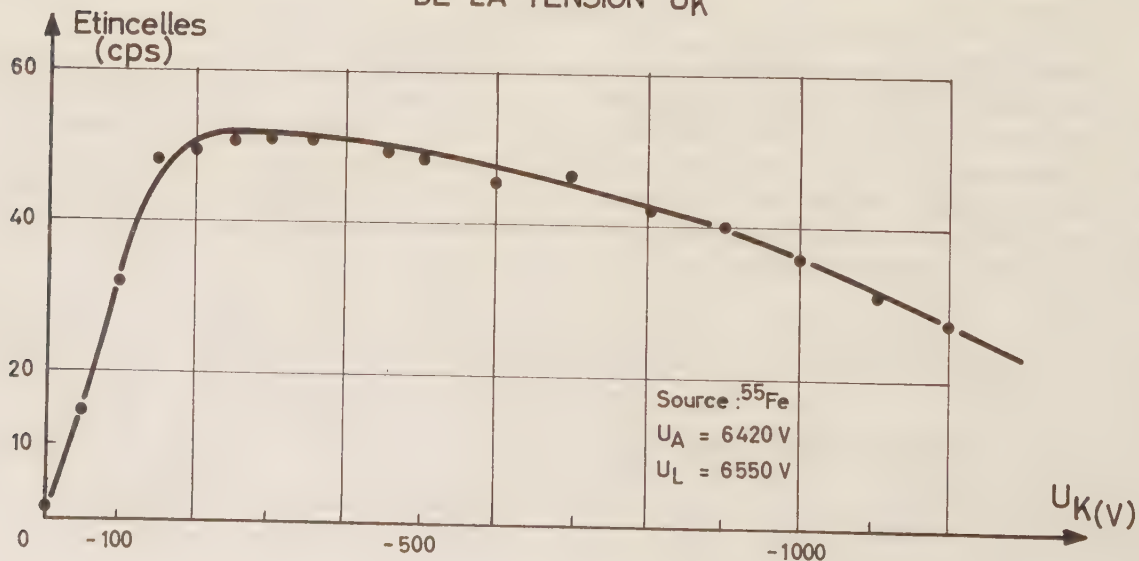
COURBES CARACTERISTIQUES DE LA CHAMBRE AVEC UN MELANGE ARGON-METHANE+ACETYLENE

Gaz : 1atm. argonU(90%)-méthane(10%)+15mm Hg acétylène

1_ COURBE DE VARIATION DU NOMBRE D'ETINCELLES EN FONCTION DE LA TENSION U_A



2_ COURBE DE VARIATION DU NOMBRE D'ETINCELLES EN FONCTION DE LA TENSION U_K



tion des étincelles. Les étincelles, lorsque $U_K = 75 \text{ V}$, commencent toujours à partir d'avalanches étalées (Pl. 50); mais lorsque $U_K = 400 \text{ V}$, les impulsions d'avalanches et la formation des étincelles sont changées, il n'y a plus une suite de quelques avalanches secondaires décroissantes, il y a une seule avalanche primaire puis, au bout d'un certain temps (100 ns à 1 μs), le développement d'une étincelle (Pl. 50). Ce fonctionnement paraît correspondre à celui de chambre avec vapeur de méthylal décrit par RAETHER ([5] page 133) voir (II-1-1b)

Dans ce cas, les effets secondaires sur la cathode sont pratiquement nuls et c'est certainement cette absence pratique d'effets secondaires qui permet d'avoir une tension limite U_L plus importante (de 100 V environ), que celle obtenue dans l'argon méthane (voir Pl. 50).

Conclusions sur l'influence du gaz :

α) Lorsque le gaz se détériore, au cours de l'utilisation de la chambre, il est possible que l'acétylène formé soit un des paramètres qui diminuent le nombre d'étincelles obtenues avec les valeurs habituelles de U_K , dans les montages à argon méthane ($U_K = 50$ à 100 V).

Mais dans ce cas, les effets secondaires ne disparaissent pas et il n'est pas possible de monter la tension U_A pour obtenir un fonctionnement satisfaisant avec une tension U_K assez négative.

β) Le mode de formation des étincelles varie avec le gaz de remplissage mais, dans chaque cas, le dispositif à 3 électrodes reste intéressant. Avec de l'argon méthane et un champ faible sur l'espace détection, la chambre à 3 électrodes, grâce à l'étalement des avalanches qu'elle produit, permet d'obtenir des étincelles à partir d'une tension U_A un peu plus faible donc sur une plage plus grande. Avec de l'argon méthane et de l'acétylène, les étincelles semblent se former de la même façon qu'avec 2 électrodes, mais dans ce cas avec 3 électrodes le rendement de détection est meilleur ainsi que l'amplification électronique qui est maximale.

Il est vraisemblable que les chambres à xénon méthylal utilisées au laboratoire marchent de cette 2^e façon (les courbes de comptage en fonction de U_K en particulier sont analogues). Les 2 types de chambres (à argon ou à xénon) ont des performances supérieures aux chambres à 2 électrodes, elles ont un meilleur rendement et elles ne nécessitent pas de précautions spéciales de fabrication et de traitement (en particulier pour l'usinage et le dégazage des matériaux).

5.- CONCLUSION SUR LES ESSAIS DE LA CHAMBRE A 3 ELECTRODES FONCTIONNANT AVEC UNE HAUTE TENSION CONTINUE :

Ce type de chambre ne nécessite qu'un appareillage réduit et sa mise en oeuvre est simple; il donne de bonnes performances avec une construction beaucoup moins délicate que celle des chambres à 2 électrodes fonctionnant en continu.

Dans le montage étudié rempli à l'argon méthane, l'application d'une tension assez faible sur l'espace détection provoque un certain étalement des avalanches issues d'un effet ionisant. Cela facilite la formation de l'étincelle, permet de travailler avec une haute tension un peu plus faible que la tension normale de décharge et donne à la chambre ses avantages particuliers.

Avec d'autres remplissages, qui donnent une plus grande absorption des photons de l'avalanche, le fonctionnement particulier vu ci-dessus ne donne pas un bon rendement dans la formation des étincelles. Mais, dans ce cas, avec une tension assez forte sur l'espace détection, les résultats restent meilleurs, bien que le mode de formation de l'étincelle paraisse analogue à celui qui se produit dans

une chambre à 2 électrodes contenant le même gaz. Cela est dû certainement au fait que tous les électrons de la trace ionisante subissent l'amplification maximale; il n'est pas besoin de monter beaucoup au-dessus de la tension de décharge U_d pour que toutes les avalanches donnent une étincelle; il n'est donc pas nécessaire d'avoir une tension limite U_L très élevée ce qui permet une construction moins délicate. Il est vraisemblable que les chambres remplies avec du xénon (et de la vapeur de méthylal) fonctionnent de cette manière.

Le rendement obtenu en étincelles correspond à peu près au rendement de détection de la chambre. La définition obtenue correspond à celle définie par la géométrie de l'ensemble grille collimatrice et espace détection. Le montage utilisé donne, avec des X d'énergie 20 à 30 keV environ 0,1 à 0,2 étincelles $s^{-1} \cdot \mu Ci^{-1}$ et permet de séparer des surfaces distantes de 8 mm. La définition est suffisante pour l'usage médical envisagé, mais le rendement, trop faible, sera augmenté en remplaçant l'argon par du xénon.

Cet appareil, par contre, possède les inconvénients suivants :

Le fonctionnement est perturbé lorsque l'énergie transportée par les étincelles devient importante; les étincelles de forte intensité, produites par une capacité de chambre importante, diminuent le nombre d'étincelles qu'il est possible d'obtenir avec une source; un nombre important d'étincelles (supérieur à $10 \cdot s^{-1} \cdot cm^2$ environ) provoque une distorsion de l'image. La détérioration du gaz produite par le dégazage des matériaux et par les effets des étincelles limite la durée de vie de la chambre. La chambre enfin est sensible aux agents extérieurs, lumière et température.

L'emploi d'un dépôt, sur verre, d'une certaine résistance carrée réduit les perturbations apportées par les étincelles, perturbation du fonctionnement de la chambre et détérioration du gaz. Avec l'argon méthane, employé pour cette étude, une circulation permet de s'affranchir complètement de la détérioration du gaz. Avec le xénon, la détérioration du gaz doit être réduite le plus possible pour augmenter la durée de vie de la chambre.

Une étude sur l'emploi d'un verre conducteur comme anode et du xénon comme gaz rare de remplissage est faite au laboratoire. Le chapitre suivant donne les résultats obtenus avec un premier prototype industriel conçu de cette manière.

V - PREMIERS RESULTATS OBTENUS AVEC UN APPAREIL FONCTIONNANT AVEC DU XENON ET AVEC UN VERRE CONDUCTEUR COMME ANODE

1.- DESCRIPTION DE L'APPAREIL

Ainsi que nous l'avons exposé précédemment, en utilisant du xénon comme gaz principal de remplissage et comme anode un verre avec dépôt de résistance carrée appropriée, il est possible d'obtenir de meilleures performances sur le même principe de chambre à 3 électrodes. Une chambre possédant les caractéristiques ci-dessus, susceptible de permettre une utilisation industrielle, est étudiée dans notre laboratoire; la construction d'un premier prototype a été confié à la Sté MECASERTO (Le Perreux - Seine -).

La chambre (voir dessin Pl. 51 et photo Pl. 52) a un diamètre utile de 20 cm; La cathode qui forme la paroi inférieure est en aluminium de 0,5 mm d'épaisseur; l'espace détection est de 20 mm et l'espace étincelles de 4 mm; le dépôt conducteur formant l'anode est un oxyde d'étain qui a une résistance carrée de 3 k Ω . Sous la paroi inférieure est fixée la grille collimatrice en plomb d'épaisseur 32 mm percée de trous de ϕ 3 mm distants de 4 mm entre centres. La chambre est remplie, à la pression atmosphérique, avec un mélange de xénon et de vapeur de méthylal dont la pression partielle est de 40 mm Hg. L'électronique associée comprend, outre les alimentations des électrodes, un dispositif de sécurité, composé essentiellement d'un intégrateur et d'un relais, qui arrête la chambre en cas d'accrochage.

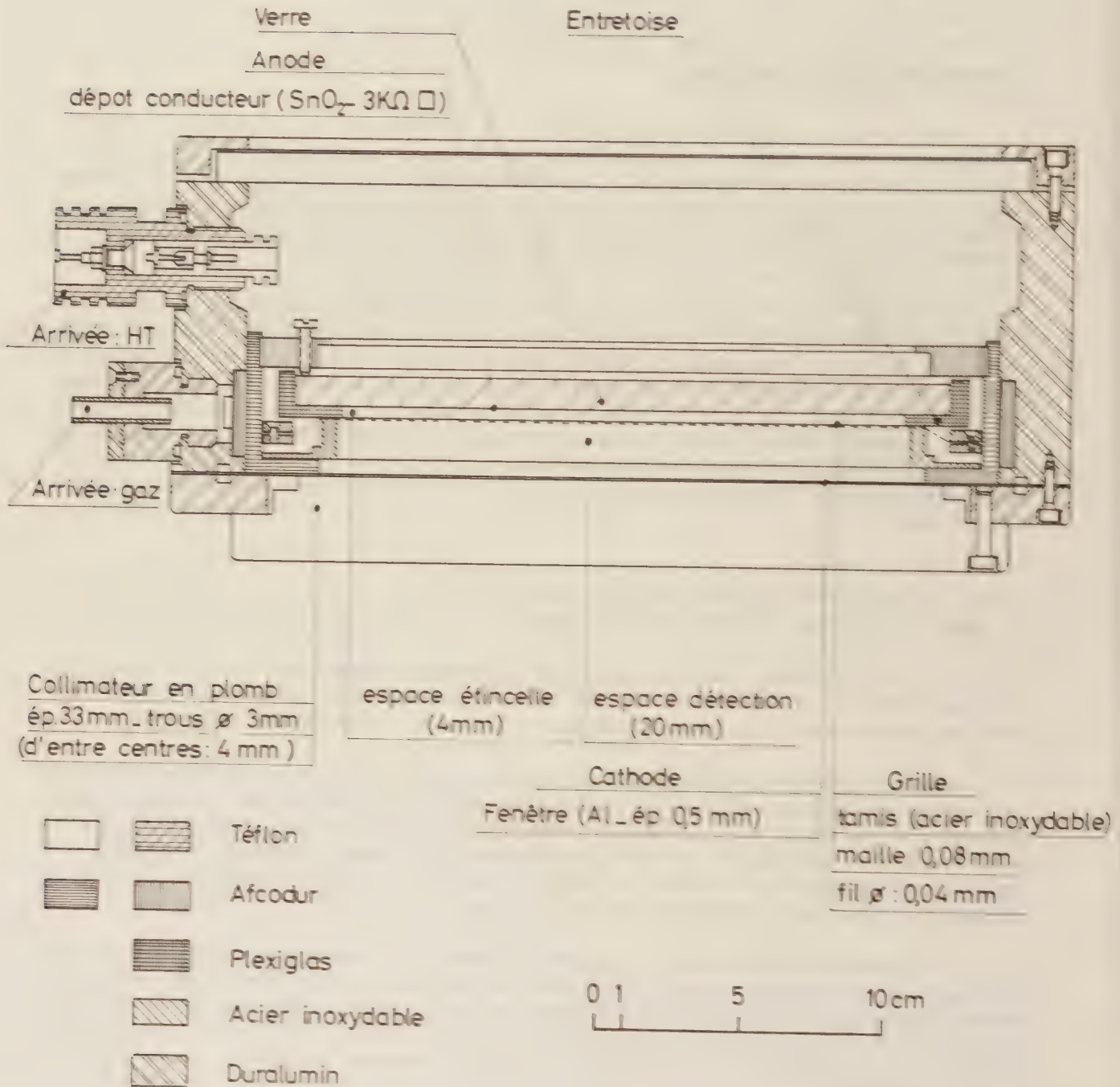
2.- ESSAIS EFFECTUES ET RESULTATS OBTENUS

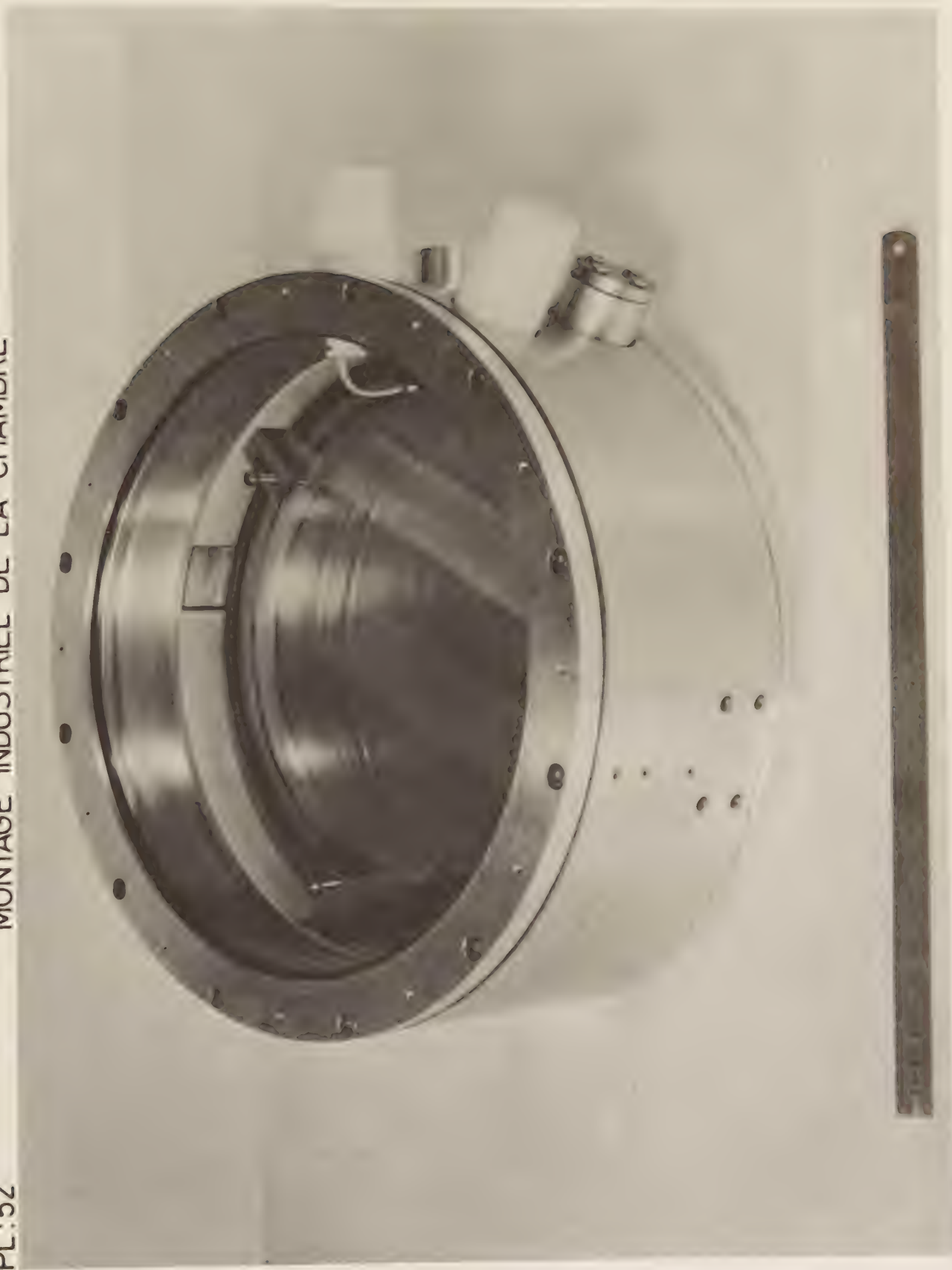
Les essais effectués ont pour but de tester le premier prototype industriel et de définir les problèmes posés par la "visualisation" "in vivo" des traceurs radioactifs. Les mesures "in vivo" sont faites au service hospitalier Frédéric JOLIOT dans le service du Professeur KELLERSHOHN.

Quelques problèmes technologiques se rapportant aux poussières et aux matériaux organiques sont résolus pendant ces essais. La chambre fonctionne, comme la précédente, avec un montage soigné mais effectué sans précaution ni traitement spéciaux. Elle est essayée avec de l'iode 125 (X de 27 keV) et du mercure 197 (X de 70 keV environ) qui sont les principaux traceurs radioactifs à rayonnement de faible énergie employés actuellement. Le rendement de la grille collimatrice est de $2,5.10^{-4}$ et le rendement de détection est environ de 12 % pour ^{125}I et de 7 % pour ^{197}Hg .

Les performances de la chambre sont encore limitées par l'énergie trop grande dépensée dans l'étincelle qui diminue le taux maximal d'étincelles qu'il est possible d'obtenir avec une source et qui donne une autonomie de fonctionnement trop faible, quelques jours à une semaine. Cependant les résultats obtenus sont intéressants, quelques uns sont donnés ci-dessous (Pl. 53 à 56) et certains sont comparés à ceux donnés par le dispositif de scintigraphie à balayage. Ces résultats ont été publiés : en 1965 et 1966 [36].

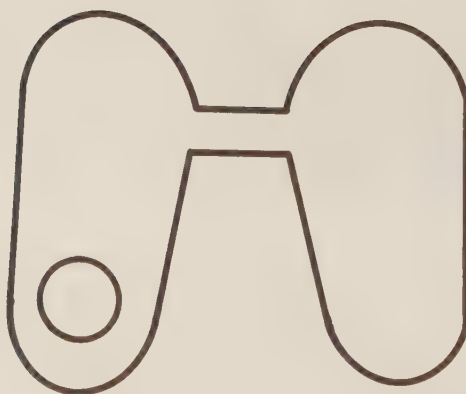
PL:51 CHAMBRE A ETINCELLES UTILISEE POUR LES ETUDES " IN VIVO "





PL:53

FANTOME DE THYROÏDE (^{125}I)



- Pl. 53 : Image d'un fantôme de thyroïde placé contre la grille collimatrice et rempli avec une solution de $20 \mu \text{Ci}$ de ^{125}I . Il y a 5 mm de plexiglas au-dessus de la source et le nodule a 1 cm de diamètre. L'image est faite en 5 minutes avec un comptage total de 20 cps (bruit de fond 6 cps).
- Pl. 54 : Image d'une mire contenant $80 \mu \text{Ci}$ de ^{197}Hg avec une pression de 1,3 atmosphère dans la chambre. L'image est faite en 5 minutes avec un comptage total de 35 cps (bruit de fond 10 cps).
- Pl. 55 : Image "in vivo" d'une thyroïde normale qui a retenu $20 \mu \text{Ci}$ de ^{125}I ; la chambre est à 6 cm de la peau et le temps est de 15 minutes.
- Pl. 56 : Images "in vivo" d'une thyroïde pathologique ayant fixé $14 \mu \text{Ci}$ de ^{125}I .

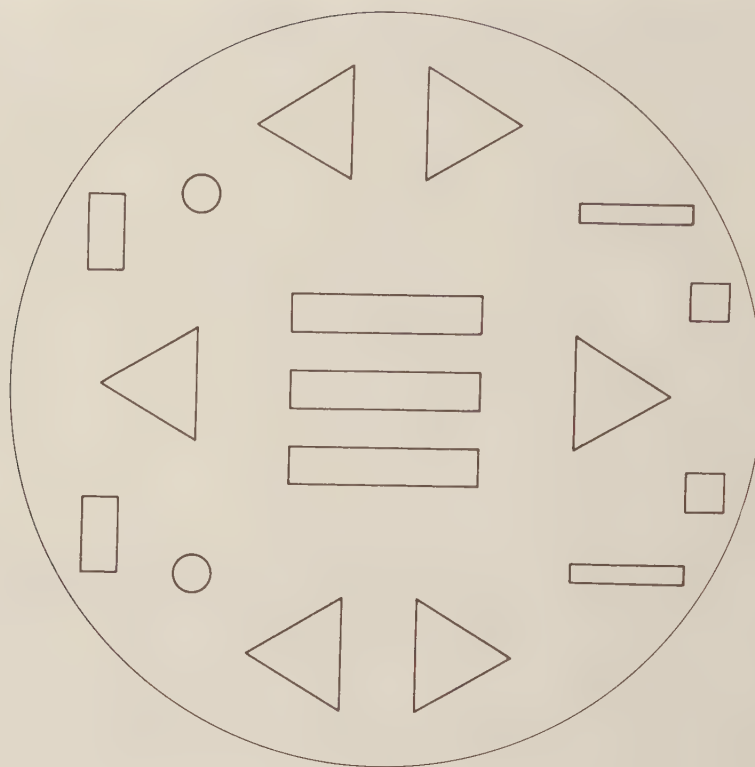
Le temps de pose avec la chambre placée à 6 cm de la peau est de 20 minutes, la durée de la mesure pour le scintigramme est de 18 minutes.

3.- CONCLUSION

Ce premier prototype donne des résultats "in vivo" qui, en général, peuvent être avantageusement comparés à ceux du dispositif à balayage : meilleure définition, pour les thyroïdes en particulier, et temps d'analyse plus réduit. L'utilisation de ce type de chambre serait intéressante pour l'analyse des thyroïdes; pour les autres emplois, des adaptations seraient nécessaires (surface plus grande...).

Des améliorations, cependant, restent à faire : augmentation des performances par la diminution de l'intensité des étincelles et surtout augmentation de l'autonomie de fonctionnement.

Des études sont poursuivies au laboratoire sur ce sujet. La résistance du dépôt conducteur est portée à environ 8 à 10 k Ω . Un circuit extérieur, déclenché par le début du signal de l'étincelle, décharge, avec un retard de 40 ns, la capacité de la chambre dans un tube de puissance : le nombre de charges passant dans l'étincelle est fortement réduit. Il est ainsi possible d'obtenir des courbes de comptage, en fonction de U_A , avec un palier important et la durée de vie de la chambre est nettement augmentée (50.10^6 étincelles). D'autres essais sont faits pour diminuer la dégradation du gaz.



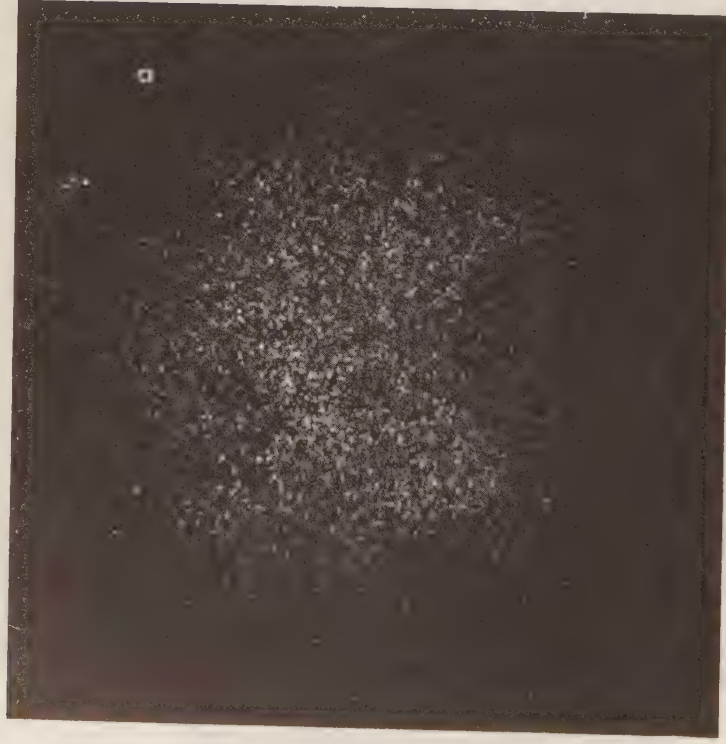
PL:55 IMAGE "IN VIVO" DE THYROÏDE NORMALE



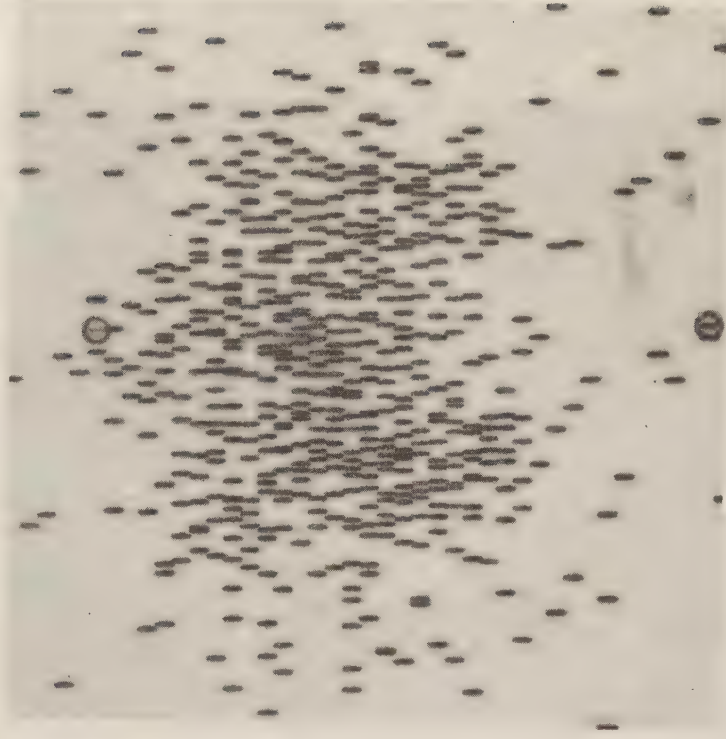
PL:56

IMAGE "IN VIVO" DE THYROÏDE PATHOLOGIQUE

Image donnée par la chambre



Scintigramme



VI - CONCLUSION

Cette étude a montré qu'il est possible d'utiliser des chambres à étincelles pour localiser les traceurs radioactifs émetteurs de particules de faible énergie.

Pour cela, nous voulions d'abord adapter, aux faibles énergies, les chambres à étincelles déclenchées qui donnent de bons résultats. Nous avons commandé le déclenchement de l'étincelle par la chambre elle-même fonctionnant, au repos, en régime proportionnel. Nous avons obtenu des résultats pratiques intéressants qui prouvent que ce dispositif est valable; il donne un bon rendement avec les particules β . L'électronique employée, cependant, n'était pas assez élaborée pour permettre de faire une étude des phénomènes et des caractéristiques de la chambre. Cette voie n'a pas été poursuivie car une solution plus intéressante s'est présentée.

Pour augmenter le rendement de la chambre pour les particules X, un montage à 3 électrodes, comprenant un "espace détecteur" associé à "l'espace étincelles", a été essayé. Nous avons constaté que ce montage, sous certaines conditions, peut donner les résultats cherchés, simplement avec une tension d'alimentation continue, sans nécessiter une impulsion de haute tension pour commander l'étincelle. Ce nouveau montage est intéressant car il est simple, sa fabrication ne nécessite pas de précautions ni de traitements spéciaux comme celle des chambres à 2 électrodes (fonctionnant avec une haute tension continue) et ses performances sont supérieures.

Les études sur cette chambre ont été effectuées avec un remplissage d'argon méthane. Avec ce mélange qui donne des effets secondaires importants, la tension maximale limite qui donne des suites d'étincelles parasites est très proche de la tension de décharge normale. Mais, avec une faible tension sur l'espace détection, il se produit un mode de formation particulier des étincelles : une dispersion des électrons de la trace primaire donne un certain étalement aux avalanches et cet étalement favorise la formation de l'étincelle. Celle-ci se produit à une tension un peu inférieure à la tension de décharge normale, ce qui donne à la chambre ses qualités particulières en plus de son rendement amélioré.

Avec un mélange gazeux qui absorbe les rayons UV et qui ne donne pas d'effets secondaires, le fonctionnement ci-dessus peut avoir lieu mais avec un mauvais rendement en étincelles. Avec une tension assez importante sur l'espace détection, l'étincelle paraît se former comme dans un montage à 2 électrodes contenant le même remplissage, mais la chambre garde des caractéristiques supérieures. Cela provient sans doute du fait suivant : tous les électrons donnés par la détection d'une particule subissent l'amplification maximale; toutes les avalanches peuvent donc donner une étincelle avec une haute tension peu supérieure à la tension disruptive, c'est-à-dire en-dessous de la tension limite qu'on peut obtenir sans précaution spéciale de construction.

Le rendement et la définition obtenus sont peu différents des valeurs théoriques : environ $0,2 \text{ c.s}^{-1} \cdot \mu\text{Ci}^{-1}$ avec une définition meilleure que le centimètre pour des X de 20 à 30 keV dans de l'argon méthane avec le dispositif utilisé.

L'emploi de xénon comme gaz rare augmente les performances. Les principaux inconvénients de la chambre proviennent des perturbations apportées par les étincelles et de l'usure assez rapide du gaz. L'emploi comme anode d'un verre conducteur ayant une certaine résistance carrée diminue l'effet dû aux étincelles. Avec l'emploi, en plus, d'un circuit extérieur de décharge qui réduit l'intensité des étincelles, seule la durée de vie reste à améliorer un peu.

Un premier dispositif monté avec verre conducteur et contenant du xénon a donné, en application médicale, avec des traceurs X de faible énergie, des résultats "in vivo" qui peuvent être avantageusement comparés à ceux obtenus avec le dispositif classique à balayage. La définition est meilleure avec des temps de pose plus courts.

Ce type de chambre a surtout été étudié en vue de l'application médicale décrite, mais il peut être utilisé dans d'autres domaines. Des essais ont été faits au laboratoire pour l'employer dans des études de diffraction X. La planche 57 donne un diagramme obtenu avec un cristal de Na Cl. Un modèle pour études spatiales est en préparation. Des essais sont poursuivis au laboratoire pour adapter ce montage à des domaines d'énergie différents. Enfin, des montages à 3 électrodes ont été étudiés pour être utilisés dans d'autres conditions en particulier en régime d'avalanches, associés à un amplificateur de lumière [37] [38] [39].

Manuscrit reçu le 18-7-1967

PL : 57 DIFFRACTION X DIAGRAMME DE LAUE
 AVEC CRISTAL DE Cl Na



BIBLIOGRAPHIE

- 1- LAPORTE M.
Décharges électriques dans les gaz
(A. Colin, Paris, 1948)
- 2- MEEK J.M. and GRAGGS J.D.
Electrical breakdown of gases
(Oxford, at the Clarenton press, 1953)
- 3- LOEB L.B.
Basic processes of gaseous electronics
(University of California press, 1960)
- 4- PAPOULAR R.
Phénomènes électriques dans les gaz
(Dunod, Paris, 1963)
- 5- RAETHER H.
Electron avalanches and breakdown in gases
(London, Butter worths, 1964)
- 6- a) BAGGE E., CHRISTIANSEN J.
Naturw. 39, 298 (1952)
b) CHRISTIANSEN J.
Z. angew Phys. 4, 326 (1952)
- 7- a) KEUFFEL J.W.
Phys. Rev. 73, 531 (1948)
b) KEUFFEL J.W.
Rev. Sci. Instr. 20, 202 (1949)
- 8- a) MANDANSKY L. et PIDD R.W.
Phys. Rev. 73, 1215 (1948)
b) MANDANSKY L. et PIDD R.W.
Phys. Rev. 75, 1175 (1949)
c) MANDANSKY L. et PIDD R.W.
Rev. Sci. Instr. 21, 407 (1950)
- 9- a) BELLA F., FRANZINETTI C.
Nuovo Cimento 10, 1335, 1461 (1953)
b) BELLA F., FRANZINETTI C., LEE D.W.
Nuovo Cimento 10, 1338 (1953)

- 10- HENNING P.G.
Atomkernenergie 2, 81 (1957)
- 11- a) BAGGE E., ALLKOEFER O.C.
Atomkernenergie 2, 7 (1957)
- b) BAGGE E., SCHMIEDER
Atomkernenergie 4, 169 (1959)
- 12- HORWITS N.H., LOFSTROM J.E., FORSAITH A.L.
a) Journal Nuclear Med. 6, 724 (1965)
b) Radiology 84, 125 (1965)
- 13- PULLAN B.R., PERRY B.J.
Conference on Medical Physics
(Harrogate, 1965)
- 14- CRANSHAW T.E., DE BEER J.F.
Nuovo Cimento 5, 1107 (1957)
- 15- FUKUIS., MIYAMOTOS.
Nuovo Cimento 11, 113 (1959)
- 16- Proc. Int. Conf. Instr. High Energy Phys.
(Berkeley 1960)
- 17- Symposium on Spark Chamber
Rev. Sci. Instr. 32, 481 (1961)
- 18- Conference on Instrumentation for High Energy Physics
Nucl. Instr. and Meth. 20, 143 (1963)
- 19- a) LABORIE P.
Thèses présentées à la faculté des Sciences de Toulouse (1963)
- b) MARQUIE B.
Thèses présentées à la faculté des Sciences de Toulouse (1963)
- c) TRAPP. J.P.
Thèses présentées à la faculté des Sciences de Toulouse (1966)
- d) MARROT G.
Thèses présentées à la faculté des Sciences de Toulouse (1966)
- 20- FISCHER J., ZORN G.T.
IRE Trans. Nucl. Sci. NS 9, n°3, 261 (1962)
- 21- CHARPAK G., MASSONET L.
Rev. Sci. Instr. 34, 664 (1963)
- 22- YASUMI S., ITOH M., MASAIKE A., MIYAKE K.
Nucl. Instr. and Meth. 31, 343 (1964)

- 23- TRUMPER J.
Atomkernenergie 5, 121 (1960)
- 24- FUKUI S., HAYAKAWAS S., TSUKISHIMA T., NUKUSHINA H.
Proc. Int. Conf. Instr. for High Energy Phys. (Berkeley 1960) page 267
- 25- a) ARECHI F.T., CAVALLERI G., GATTI E., REDAELLI G.
Energia. Nucl. 8, 539 (1961)
- b) CAVALLERI G., GATTI E., NASINI N., REDAELLI G.
Energia. Nucl. 8, 779 (1961)
- c) CAVALLERI G., GATTI E., REDAELLI G.
Nuovo Cimento. 15, 1282 (1962)
- 26- LANSIART A., LELOUP J.
Congrès d'Electronique Nucléaire - (Paris 1963)
O.C.D.E., 83 (1964)
- 27- KELLERSHOHN C., LANSIART A., DESGREZ A.
Medical Radioisotope Scanning
I.A.E.A. Vol. 1, 333 (1964)
- 28- PETER G., PISAREV A.F., VAHLBRUCH K.M.
Rapport : Inst. unifié de Rech. Nucl. Dubna U.R.S.S. (1962)
- 29- EVANS R.D.
The atomic nucleus
(Mc. Graw-Hill book coj pany Inc. New-York, Toronto, London (1955))
- 30- THOLL H.
- z. Naturforsch, 18a, 587 (1963)
- 31- a) WARD A.L.
- Journal Appl. Phys., 36, n°8, 2540 (1965)
- b) WARD A.L.
- Journal Appl. Phys., 35, n°3, 469 (1964)
- 32- MORUCCI J.P.
Thèses présentées à la faculté des Sciences de Paris le 14.12.1965
- 33- SIEGBAHN K.
Beta and gamma ray-spectroscopy
(North-Holland Publishing Company-Amsterdam 1955)
- 34- GARDENER M., KISDINSASAMY S., ROSSLE E. WOLFENDALE A.W.
Proc. Phys. Soc. B 70, 687 (1957)
- 35- ENGLISH W.N. et HANNA G.C.
Canadian Journal of Phys. 31, 768 (1953)

- 36- LANSIART A., KELLERSHOHN C.
 - a) Abstracts of first International Congress on Medical Physics (Harrogate, 1965)
 - b) Nucleonics Vol. 24, n°3, 56 (1966)

- 37- LANSIART A., MORUCCI J.P., ROUX G.
 - Scintillation and Semiconductor Counter Symposium
 - I.E.E.E. Trans. Nucl. Sci. NS 13, n°3, 393 (1966)

- 38- LANSIART A., MORUCCI J.P., ROUX G., LELOUP J.
 - Nucl. Inst. and Meth. 44, n°1, 45 (1966)

- 39- LANSIART A.
 - Thèse doctorat es-Sciences - Orsay 1967

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

"Cibles à conduction par émission secondaire"

Vu et approuvé :

Orsay, le 16 Février 1967

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

BERGERARD

Vu

et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

Le Recteur d'Académie
Adjoint au Recteur de
l'Académie de Paris

Cl. CHALIN

